

Verbundprojekt:

ViFa – Virtueller Fahrtrainer

Entwicklung eines virtuellen Fahrtrainers zur Unterstützung einer verbrauchs- und verschleißoptimierten Fahrweise

Schlussbericht

Beiträge der Zuwendungsempfänger:

MAN Truck & Bus AG (MAN)
Dachauer Straße 667
80995 München

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM)
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15
85748 Garching

Autoren: Daniel Heyes (MAN), Thomas J. Daun (FTM), Karlheinz Dörner (MAN), Markus Lienkamp (FTM)

Laufzeit: **01.10.2010 – 30.09.2013**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen **19 G 10013A** und **19 G 10013B** gefördert.



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

München, 31.03.2014

Inhaltsverzeichnis



I Aufgabenstellung und Zielsetzung

Aus heutiger Sicht ist der Schritt zum autonomen Fahren im öffentlichen Verkehr in naher Zukunft nicht erreichbar. Obwohl die Anzahl der Assistenzsysteme ständig ansteigt, bleiben vor allem der Fahrer und dessen Umgang mit dem Fahrzeug die wesentliche Einflussgröße bei der Einsparung von Kraftstoff und dem Verschleiß von Komponenten. Während aus umweltpolitischer Sicht die Reduzierung der CO_2-Emissionen und Schonung der Ressourcen von zentraler Bedeutung sind, stehen bei Fuhrunternehmern vielmehr Kostenreduzierung und Total Cost of Ownership (TCO) im Vordergrund. Diese Ziele müssen sich jedoch nicht widersprechen, wenn die weitere Reduzierung der Emissionen und Schonung der Ressourcen nicht mit aufwändigen und teuren Techniken erkauft werden muss. Bisher lag der Fokus überwiegend auf der Verbesserung der Technik; der Fahrer blieb weitgehend außen vor. Dabei verbirgt sich gerade beim Fahrer ein erhebliches Potential, das ohne teuren technischen Aufwand genutzt werden kann.

Kostenanalysen zeigen, dass der Anteil der Kraftstoffkosten im Jahr 2007 mehr als 25 % der Gesamtkosten im Lkw-Fernverkehr betrug - dies mit steigender Tendenz (Abbildung 1). Dies verdeutlicht die Relevanz dieses Kostenanteils für Fuhrunternehmer.

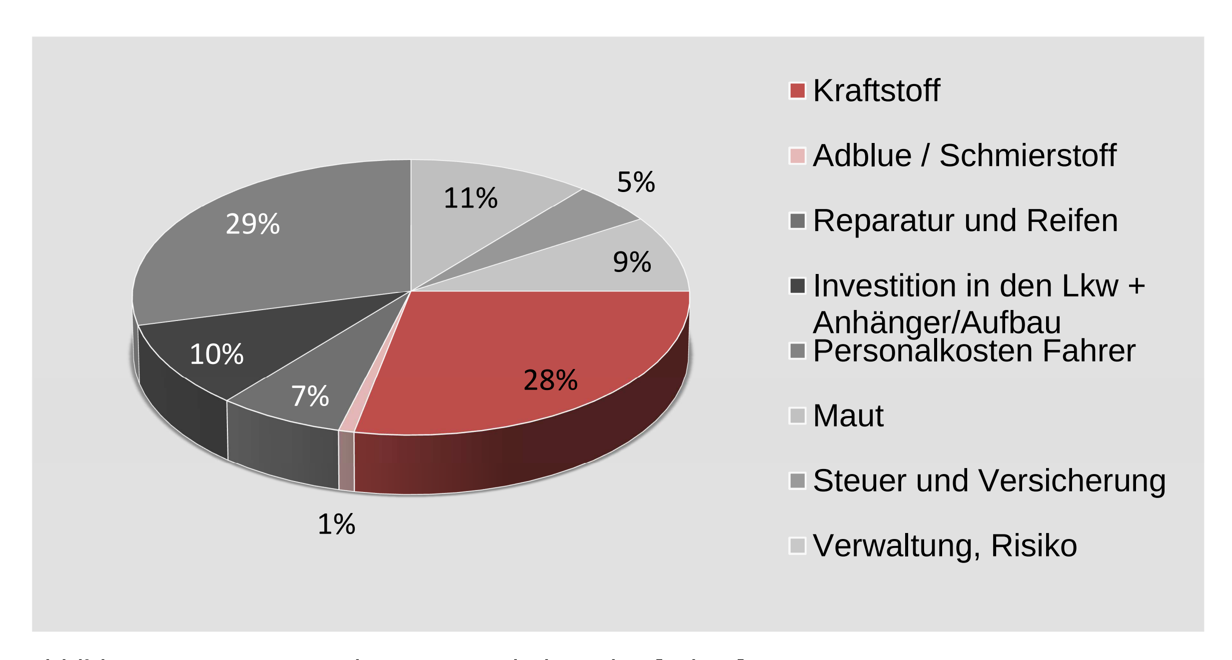


Abbildung 1: Kostenstruktur Fernverkehrs-Lkw [Wit11].

Beim Fahrer muss ein Bewusstsein zur Senkung des Verbrauchs und des Verschleißes geschaffen werden. Dies wird derzeit abgedeckt durch Fahrerschulungen und Fahrweisenoptimierung durch geschulte Trainer, die mit den Fahrern bei der Schulung mitfahren und dem Fahrer mitteilen, wann er welche Eingriffe bei seinem Fahrzeug für ein verbrauchs- und verschleißoptimiertes Fahren vornehmen soll. Die dabei durchgeführten Messungen zeigen ein deutliches Einsparpotential auf. Diese Erfolge sind allerdings häufig nur von kurzer Dauer, weil viele Fahrer nach den Schulungsmaßnahmen wieder sehr schnell in alte Gewohnheitsmuster zurückfallen. Das erlernte Wissen wurde noch nicht verinnerlicht oder Fahrsituationen werden falsch eingeschätzt. Hinzu kommt, dass bislang nur ein Bruchteil der Fahrer an entsprechenden Fahrerschulungen teilnimmt.

Um auch langfristige Effekte zu erzielen und den Aufwand für individuelle Schulungsfahrten zu reduzieren, erscheinen technische Systeme sinnvoll, die dem Fahrer während oder nach der Fahrt verbrauchsoptimierende und verschleißmindernde Verhaltensweisen vorschlagen bzw. ein mögliches Fehlverhalten kommunizieren können. Dies entspricht der Idee eines „Virtuellen Fahrtrainers“ (ViFa), eines Assistenzsystems, das aus einer Vielzahl von Eingangsgrößen, wie Bedieneingaben und Umweltbedingungen, die Fahrweise analysiert und bei Bedarf Fahrempfehlungen an den Fahrer zurückmelden kann.

Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines Virtuellen Fahrtrainers zur Unterstützung des Fahrers für eine verbrauchs- und verschleißoptimierte Fahrweise.

Zur Erreichung dieses Ziels muss ermittelt werden, welche Signale zur Erkennung von verbrauchserhöhenden Fahrfehlern herangezogen werden können, in welcher Weise diese Signale analysiert werden müssen und welche Korrelationen es gibt, um daraus letztlich ein optimierungsbedürftiges Fahrerverhalten zu erkennen und dem Fahrer geeignete Empfehlungen zu geben. Hier soll zwischen Meldungen unterschieden werden, die dem Fahrer sofort angezeigt werden und Meldungen, die dem Fahrer als Zusammenfassung z. B. am Ende der Fahrt mitgeteilt werden.

Bei den Meldungen muss die Art und Weise der Informationsübermittlung an den Fahrer erarbeitet werden, damit die vorgeschlagenen Eingriffe auch vom Fahrer verstanden und umgesetzt werden. Dies ist nur zu erreichen, wenn die Informationsübermittlung für den Fahrer motivierend wirkt.

Neben dieser Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS, engl. Human-Machine-Interface, HMI), die den Fahrer zur Befolgung der Hinweise motivieren muss und die er nicht als bevormundend oder gar störend empfinden darf, ist die eigentliche Problemstellung der Erkennung ungeeigneter, verbrauchserhöhender Fahrweisen zu lösen. Eine besondere Herausforderung ergibt sich daraus, dass die Fahrweise nicht allein vom Fahrer bestimmt wird, sondern auch vom Umgebungsverkehr, den Straßen- und Umweltbedingungen und der Topografie der Straßen. Aus der Fülle der Einflüsse gilt es den Fahrereinfluss herauszufiltern. Dieser muss dann bewertet werden, wozu geeignete Bewertungskriterien gefunden werden müssen. Als Ergebnis dieser Bewertungen kann dem Fahrer dann ein Hinweis zur Optimierung seiner Fahrweise gegeben werden.

Aufgrund der Vielzahl der Einflüsse und der für eine Bewertung zu findenden Bewertungskriterien stellt die Analyse eine hochkomplexe Aufgabe dar. Ein realer Fahrtrainer, der neben dem Fahrer sitzt und dessen Fahrverhalten bzw. Fahrzeugbedienung beobachtet, nimmt auch die für ihn sichtbare Fahrumgebung wahr und bezieht diese bei der Analyse des Fahrerverhaltens mit ein. Er erkennt zum Beispiel, wenn eine Ampel auf Rot umschaltet und das Fahrzeug ausrollen sollte, oder wenn vor ihm ein Fahrzeug rechts abbiegt und der LKW trotz schneller Annäherung nicht abbremsen muss, da sich abschätzen lässt, ob der Abbieger rechtzeitig die Fahrspur verlassen wird. Solche Informationen sind mit heutiger Onboard-Sensorik nicht erfassbar. Für die Aufgabenstellung wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug hinsichtlich der Umgebungserfassung über eine Sensorik zur Erfassung des Abstands des vorausfahrenden Fahrzeugs verfügt, da diese ab 2013 wegen des dann vorgeschriebenen Notbremssystems für neue LKW-Typen obligatorisch sein wird. Ferner wird davon ausgegangen, dass im Fahrzeug das Höhenprofil der vorausliegenden Fahrstrecke in ausreichender Genauigkeit verfügbar ist. Da die Kenntnis des vorausliegenden Höhenprofils jedoch zu einer verbrauchsoptimierten Fahrweise beitragen kann, werden einem solchen

System große Marktchancen eingeräumt. Wie vorausliegende Höhenprofile in ausreichender Genauigkeit bereitgestellt werden, war zum Start des Projekts noch unklar und wurde daher in diesem Projekt näher betrachtet. Aufbauend auf fahrzeuginterner Sensorik sowie vorgenannten Umgebungsdaten soll untersucht werden, welches Fehlerverhalten des Fahrers hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs erkennbar ist. Darüber hinaus wird betrachtet, welche optimierungsbedürftigen Verhaltensweisen des Fahrers zusätzliche Umgebungssensorik benötigen, um erkannt werden zu können.

Neben der verbrauchsoptimierten Fahrweise ist auch eine verschleißmindernde Fahrweise von Bedeutung. Hierzu gilt es die Fahrweise eines Fahrers hinsichtlich des Komponentenverschleißes (z. B. Motor, Kupplung, Getriebe, Bremsen) zu analysieren und negative Einflüsse des Fahrerverhaltens auf den Komponentenverschleiß zu identifizieren. Auch hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Fahrzeugführung nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern stark von den Umgebungsbedingungen mitbestimmt wird.

II Stand der Technik

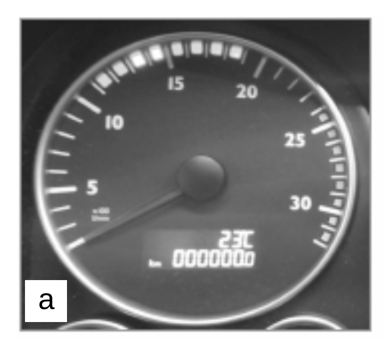
Die folgenden Abschnitte geben den Stand der Technik zu Beginn des Projekts wieder und sind im Wesentlichen dem unveröffentlichten Förderantrag [Dör10, S.11ff] des Projekts Virtueller Fahrtrainer entnommen.

II.1 Fahrerschulungen

Zur Verbesserung des Fahrstils werden von allen Herstellern spezielle Trainingskurse angeboten. Dabei fahren die Teilnehmer in Begleitung erfahrener Fahrtrainer bestimmte Strecken ab. Der Trainer beobachtet das Fahrerverhalten und gibt dem Fahrer Hinweise zu verbrauchs- und verschleißoptimierter Fahrweise. Diese Trainings dauern meist wenige Tage und führen zu deutlichen Verbrauchsreduzierungen. Diese sind jedoch nicht nachhaltig, d. h. das Gelernte wird noch eine gewisse Zeit angewendet und im Laufe der Zeit dann immer weniger [Gei08], [Wah07]. Neben diesem Problem bedeutet die Fahrerschulung für den Unternehmer auch einen Ausfall des Fahrers während der Schulungszeit und es fallen Schulungskosten an. Nicht zuletzt aus diesen Gründen nimmt nur ein Bruchteil der LKW-Fahrer an solchen Schulungen teil.

II.2 Derzeitige technische Lösungen

Heutige Fahrzeuge haben zwar bereits diverse Anzeigen, die den Fahrer für ein verbrauchsoptimiertes Fahren unterstützen sollen, jedoch sind diese Anzeigen rein informativer Gestalt. Der Fahrer kann dazu mit den erforderlichen technischen Kenntnissen sein Fahrverhalten anpassen, er wird dazu aber weder animiert noch motiviert. Beispiele hierfür sind der grüne und rote Bereich des Drehzahlmessers, Kraftstoffverbrauchsanzeigen und vereinfachte Schaltpunktanzeigen (Abbildung 2).



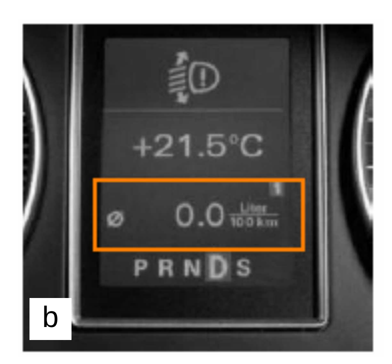




Abbildung 2: Anzeigen zur Unterstützung des verbrauchsoptimierten Fahrens: a Drehzahlmesser (MAN TGX); b Kraftstoffverbrauchsanzeige (Audi A4 B7); c Schaltpunktanzeige (BMW E87) [BMW07]

In 2009 führten Nissan, Audi und Scania Systeme ein, die gegenüber den vorgenannten dem Fahrer besser vermitteln sollen, wie er verbrauchsoptimal fährt (Abbildung 3).

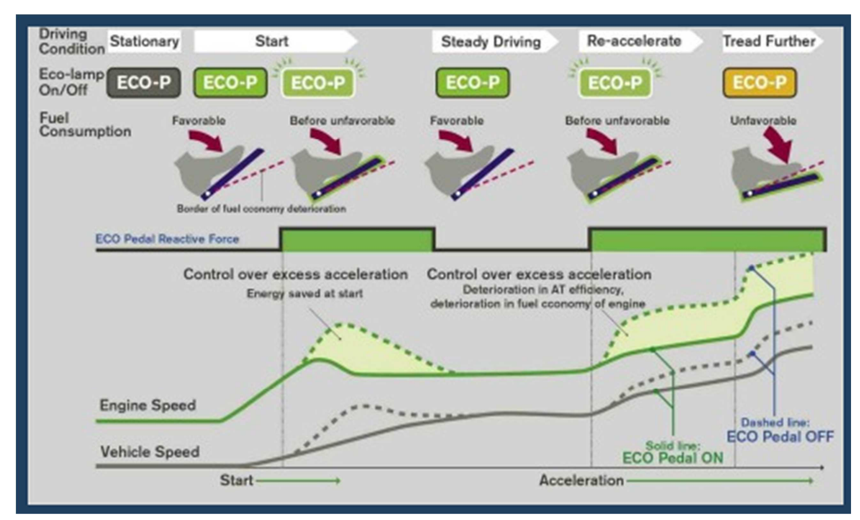


Abbildung 3: Nissan (PKW) Fahrpedalauswertung, 2009 (ECO-Gaspedal) [Sue07]

Nissan führte im PKW ein aktives Gaspedal ein zur Vermeidung unnötig hoher Beschleunigungen. Dazu wird bei zunehmender Gaspedalauslenkung die voraussichtliche eintretende Beschleunigung berechnet. Erscheint diese als unnötig hoch, so wird der Gegendruck im Gaspedal erhöht und dem Fahrer somit ein haptisches Feedback gegeben.

Audi stellte in 2009 einen **B**ord **C**omputer **m**it **E**ffizienzprogramm (BCmE) vor. Dieser kann dem Fahrer Schaltempfehlungen und verschiedene "Sparhinweise" geben (Abbildung 4 und Abbildung 5).



Abbildung 4: Audi Schaltempfehlung [Aut09]



Abbildung 5: Audi Sparhinweise [Aut09]



In seiner schweren Lkw-Reihe führte Scania 2009 ein System ein, das das Fahrerverhalten in vier Kategorien bewertet. Die Kategorien sind gegliedert in "hill driving", "brake use", "choice of gears" und "anticipation". Die Hinweise zu diesen vier Kategorien werden dem Fahrer in Form von "driving tips" angezeigt (Abbildung 6).

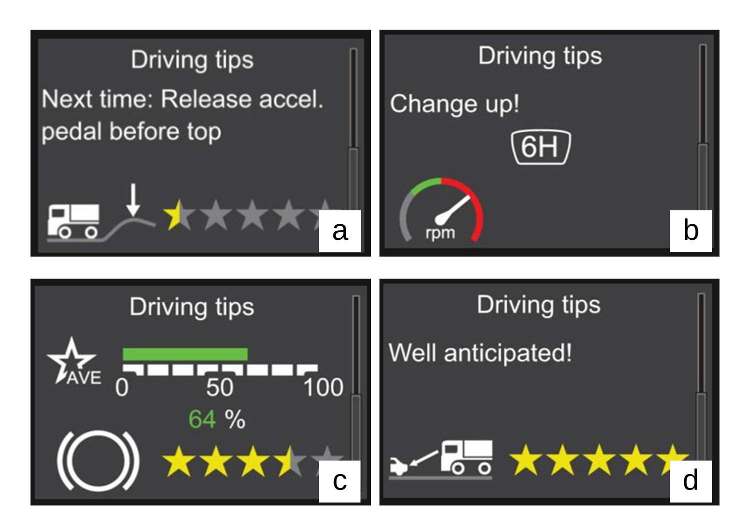


Abbildung 6: Scania Driving Tips: a hill driving; b choice of gears; c brake use; d anticipation [And10]

Das optimale Rollen über Kuppen und durch Senken erfordert viel Erfahrung. Es ist für den Fahrer kaum möglich, wirklich den optimalen Zeitpunkt zu treffen, an dem er das Gaspedal lösen oder den Tempomaten oder ACC ausschalten sollte. Ein allgemeiner Hinweis, dass der Fahrer bei der nächsten Kuppe früher vom Gas gehen sollte, hilft nur bedingt. Zur genauen Bestimmung des optimalen Zeitpunkts muss das vorausliegende Höhenprofil berücksichtigt werden. In dem von Scania eingeführten System wird weder das vorausliegende Höhenprofil ausgewertet, noch wird dem Fahrer ein konkreter Zeitpunkt genannt, an dem er vom Gas gehen sollte.

Mit der angezeigten Schaltempfehlung (choice of gears) wird der Fahrer darauf hingewiesen, dass er schalten sollte, um den Motor im verbrauchsgünstigen Kennfeldbereich zu betreiben. Die Schaltempfehlung baut auf quasistationären Zuständen auf, in denen erkannt wird, dass der Motor nicht im optimalen Kennfeldbereich betrieben wird. Eine Streckenvorausschau erfolgt dabei nicht. So kann es vorkommen, dass das System ein sinnvolles vorausschauendes Schalten des Fahrers bemängelt, z. B. wenn dieser vor einer Steigung frühzeitig in einen kleineren Gang schaltet. Da das System die Steigung nicht "sieht", fordert es den Fahrer auf, einen Gang hochzuschalten. In der Bremsennutzung (brake use) wird hinsichtlich Komponentenverschleiß der Einsatz der Betriebsbremsen in Relation zum Einsatz der Dauerbremsen bewertet.

Kennzeichnend ist am derzeitigen Stand der Technik, dass mit Ausnahme von Schaltempfehlungen, die jedoch auch nur auf quasistationären Zuständen basieren, die Hinweise an Fahrer immer erst nach Ablauf der Fahrsituationen oder rein statistisch ausgegeben werden.

Ergänzend zu den genannten Onboard-Fahrerinformationen gibt es Telematiksysteme (z. B. [Man10]), die Daten aus dem Fahrzeug heraus an den Fuhrunternehmer senden. Dabei werden relevante Verbrauchsdaten als klassifiziert in einem Fahrzeugsteuergerät abgelegt und per Mobilfunk an den Fuhrunternehmer übermittelt. Dieser hat somit die Möglichkeit zu

beurteilen, ob seine Fahrer das Fahrzeug verbrauchsorientiert fahren und kann seinen Fahrern dafür auch besondere Anreize bieten.

II.3 Digitale Karten

Der Markt für kommerziell angebotene digitale Kartendaten wird von zwei Herstellern dominiert: Navteq [Dur11] und Tele Atlas (TomTom) [Tel10]. Beide arbeiten daran, vorausliegende Streckendaten für Assistenzsysteme bereitzustellen. Für die vorgesehene Anwendung zur Optimierung der wirtschaftlichen Fahrweise ist ein sehr genaues Höhenprofil bzw. Steigungsprofil der Fahrstrecke erforderlich. Bisher werden die Höhendaten aus digitalen Karten ausschließlich für optimierte Routenberechnungen in der LKW-Navigation verwendet. Hierfür müssen die Höhendaten nicht so genau sein wie für die wirtschaftliche Optimierung der Fahrweise entlang einer Fahrroute. Seitens der Kartenhersteller liegen Höhendaten für die primären Straßen (Autobahnen, Bundesstraßen) vor. Diese werden beim Abfahren der Strecken von den Kartenherstellern mit aufgenommen.

Für Straßen untergeordneter Kategorien (z. B. Landstraßen) lagen zum Projektstart größtenteils noch keine Höhenprofile in den digitalen Karten vor. Tele Atlas (TomTom) verfolgt hier das Ziel, die Höhenprofile solcher Straßen aus Community-Inputs zu generieren, ohne die Straßen gezielt abzufahren. Das bedeutet, dass TomTom-Navigationgeräte, die von Kunden verwendet werden, Daten an TomTom senden, und dass in diesen Daten neben der jeweiligen Fahrzeugposition und der Fahrgeschwindigkeit auch die jeweilige Höhe enthalten ist. Werden die Straßen ausreichend oft von Kunden mit solchen TomTom-Geräten gefahren, kann TomTom daraus ein Höhenprofil der Strecke generieren.

III Eingehende Darstellung (erzielte Ergebnisse und Nutzen)

Das Projekt Virtueller Fahrtrainer gliedert sich in neun Arbeitspakete (AP) [Dör10, S.22ff]:

- **AP1 Anforderungsanalyse:** Ziel dieses Arbeitspakets ist es, zunächst eine umfassende Liste mit möglichen Fahrsituationen zu erstellen, in welchen die Fahrer unökonomisch in Bezug auf Kraftstoffverbrauch und Verschleiß fahren. Des Weiteren werden zu den jeweiligen Situationen eine optimale Fahrweise und eine Handlungsanweisung für den Fahrer abgeleitet.
- **AP2 Fahranalyse:** Zu den einzelnen, im Situationskatalog genannten fehlerhaften Verhaltensweisen des Fahrers werden jeweils Konzepte erstellt, wie die Fahrweise mit Hilfe eines technischen Systems analysiert werden kann, um dann ein solches Fahrfehlverhalten erkennen zu können. Wichtig dabei ist die Vermeidung fehlerhafter Analyseergebnisse, damit der Fahrer bei korrektem Fahrerverhalten keine ungeeigneten Fahrempfehlungen aufgrund einer fehlerhaften Analyse erhält.
- **AP3 Sensorik:** In diesem Arbeitspaket wird untersucht, inwieweit die bisher im LKW verbaute Sensorik für den Virtuellen Fahrtrainer geeignet ist. Schwerpunktmäßig wird die Eignung digitaler Karten bewertet, da diese imstande sind, den Horizont des Virtuellen Fahrtrainers erheblich zu erweitern.
- **AP4 Mensch-Maschine-Schnittstelle:** Die Akzeptanz eines virtuellen Fahrtrainers hängt maßgeblich von der Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ab. Hier gilt es geeignete Kommunikationsmöglichkeiten zu identifizieren und die Schnittstelle fahrerfreundlich zu gestalten. Ziel dieses Arbeitspakets ist die Definition der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie einer Schulungsstrategie, die eine dedizierte Filter- und Priorisierungsstrategie enthält.
- **AP5 Akzeptanzprüfung:** Einsparungen in Bezug auf Kraftstoffverbrauch und Verminderung des Komponentenverschleißes lassen sich durch den Virtuellen Fahrtrainer nur erzielen, wenn das System vom Fahrer auch angenommen und angewendet wird. Daher ist die Akzeptanz des Virtuellen Fahrtrainers beim Nutzer, also dem Fahrer, von enormer Bedeutung und Optimierungsmöglichkeiten zur Sicherstellung der Nutzerakzeptanz müssen frühzeitig bestimmt werden.
- **AP6 Realisierung Prototyp:** Zielsetzung des Arbeitspakets ist die Realisierung und Evaluierung des Konzepts für Fehler- und Situationserkennung.
- **AP7 Aufbau Demonstrator:** Ziel dieses Arbeitspakets ist der Aufbau eines Demonstrators zur Untersuchung und Demonstration der entwickelten Funktionen. Dies umfasst die Integration von Steuergeräten und deren Anbindung an die Fahrzeugstruktur, die Anpassung und den Einbau von Sensorik sowie die Umsetzung und die Einbindung der Mensch-Maschine-Schnittstelle.
- **AP8 Funktionsvalidierung:** Der Schwerpunkt der Arbeiten in diesem Arbeitspaket liegt in der Funktionsvalidierung und der Optimierung des realisierten Systemkonzepts. Die Erprobung erfolgt in realen Verkehrssituationen. Zunächst werden Erprobungsfahrten von den Entwicklern durchgeführt, die dann nach erster Validierung des

Systems von erfahrenen Fahrtrainern begleitet werden. Nicht zufriedenstellende Systemreaktionen werden im Rahmen von Versuchsfahrten identifiziert, bei Bedarf in der Offline-HIL-Simulation nachgestellt und die Ursachen der unzulänglichen Systemreaktion untersucht. Hierbei sollen Funktionsmängel erkannt und die Funktionalität optimiert oder notfalls eingeschränkt werden, bevor in einem nachfolgenden Probandenversuch Akzeptanztests durchgeführt werden.

- **AP9 Erprobung mit Probanden:** Zur Bewertung des prototypisch realisierten Virtuellen Fahrtrainers aus Fahrersicht werden Fahrtests mit Probanden durchgeführt. Hierbei soll die Akzeptanz des Systems sowie das Interaktionsverhalten zwischen Fahrer und System mit Probanden geprüft werden. Des Weiteren soll auch der Schulungserfolg des Virtuellen Fahrtrainers betrachtet werden. In der abschließenden Erprobung und Akzeptanzprüfung wird der Prototyp von unterschiedlichen Probanden gefahren und anhand eines Fragebogens bewertet.

III.1 AP1 Anforderungsanalyse

Die Anforderungsanalyse bildet die Basis für die weiteren Entwicklungsaktivitäten und bestimmt maßgeblich die spätere Ausgestaltung des Virtuellen Fahrtrainers.

Die Erstellung der Anforderungsbeschreibungen für die Fahrsituations- und Fahrfehlererkennung muss methodisch erfolgen, damit einerseits keine relevanten Fahrsituationen übersehen werden, jedoch andererseits die Vielzahl an Informationen verdichtet und nur solche Fahrsituationen in größerer Tiefe betrachtet werden, die ein hohes Einsparpotential versprechen (Abbildung 7).

Ausgangspunkt für die Anforderungsbeschreibung ist die Erstellung eines umfassenden Situationskatalogs mit potenziellen Fahrfehlern. In einem mehrstufigen Prozess wird zuerst der allgemeine Wissensstand zur Schulung einer wirtschaftlichen Fahrweise festgestellt, indem einschlägige Schulungsunterlagen gesichtet und Schulungsprogramme analysiert werden. Dieses Erfahrungswissen wird mit dem aktuellen Stand der Forschung abgeglichen und Erkenntnisse aus bereits durchgeführten oder laufenden Forschungsprojekten werden berücksichtigt. Diese Informationen fließen in einen fragmentarischen Situationskatalog ein, der Experten innerhalb der MAN Truck & Bus AG vorgelegt und mit deren Angaben ergänzt wird. Daraus leitet sich ein umfassender Situationskatalog ab. Aus den durch Literatur und Expertenbefragung gewonnen Erkenntnissen wird für jeden Fahrfehler das Einsparpotential angegeben, das voraussichtlich durch den Einsatz eines Virtuellen Fahrtrainers erzielt werden kann. Dabei wird berücksichtigt, dass sich das Einsparpotential aus der Fahrfehlerhäufigkeit, der Umsetzungswahrscheinlichkeit der Fahrempfehlung des Virtuellen Fahrtrainers und der Kraftstoff- oder Verschleißreduzierung zusammensetzt. Da die genaue Bestimmung des Einsparpotentials für eine Vielzahl von Fahrfehlern oftmals nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand möglich ist, wird auf Basis der vorhandenen Informationen eine Experteneinschätzung vorgenommen, um Fahrfehler nach ihrem Einsparpotential zu priorisieren.

Dadurch gelingt es, den Umfang von ursprünglich 150 Fahrsituationen auf ungefähr 30 relevante Fahrsituationen zu reduzieren.

Für diese geringere Zahl relevanter Fahrsituationen werden Anforderungen an Funktionen beschrieben, die die jeweilige Fahrsituation und die in der Fahrsituation möglichen Fahrfehler erkennen können. Als Grundlage für die Formulierung der Anforderungen werden die im pri-

orisierten Situationskatalog erarbeiteten Informationen herangezogen und fehlende Daten durch Fahrversuche und Simulationen ergänzt. In einem abschließenden Expertenreview werden die Einheitlichkeit und Vollständigkeit der Anforderungsbeschreibungen überprüft.

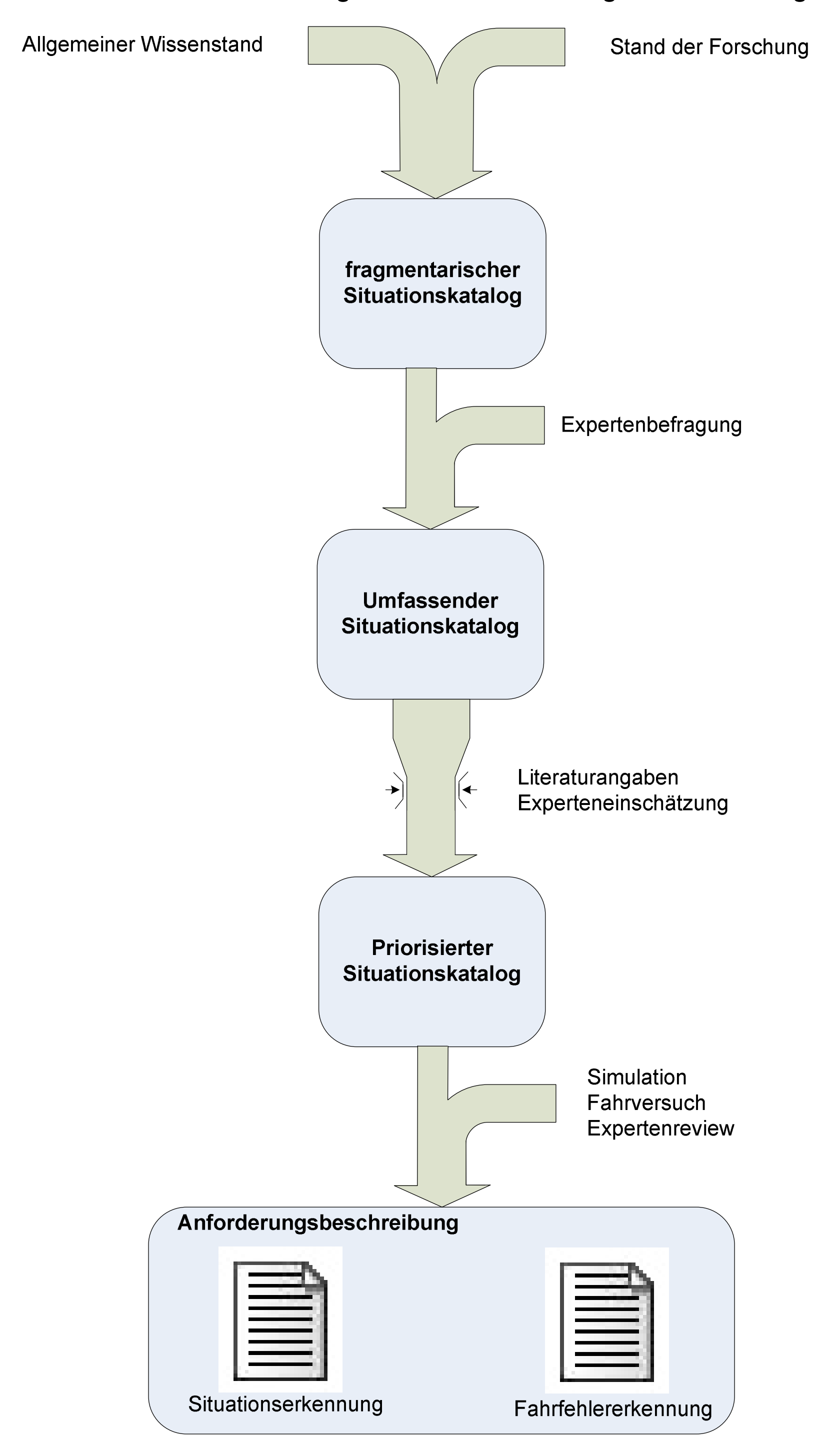


Abbildung 7: Methodisches Vorgehen zur Identifikation von Anforderung zur Situations- und Fahrfehlererkennung [Hey12].

Zur übersichtlichen Gliederung lassen sich die Fahrfehler in die Bereiche der vorausschauenden Fahrhinweise und Hinweise zur Verbesserung des Fahrstils einordnen (Abbildung 8). Der Virtuelle Fahrtrainer gibt vorausschauende Fahrhinweise und Hinweise zur Verbesse-

rung des Fahrstils. Die vorausschauenden Fahrhinweise helfen dem Fahrer, frühzeitig auf die Topografie, Infrastruktur und andere Verkehrsteilnehmer zu reagieren. Zur Verbesserung des Fahrstils wird die Fahrweise des Fahrers analysiert. Dabei wird beobachtet, wie der Fahrer die Geschwindigkeit des Fahrzeugs beeinflusst (z. B. Nutzung der Geschwindigkeitsregelanlage, Einhaltung einer maximalen Reisegeschwindigkeit), wie der Motor betrieben wird (z. B. Motor im Stillstand abstellen, bei Handschaltfahrzeugen im verbrauchsgünstigen Drehzahlbereich fahren) und das Bremssystem und Kupplung verschleißgünstig betätigt wird (z. B. Einsatz des Retarders bei leichter Verzögerung, verschleißarmes Schließen der Kupplung) [Hip13].

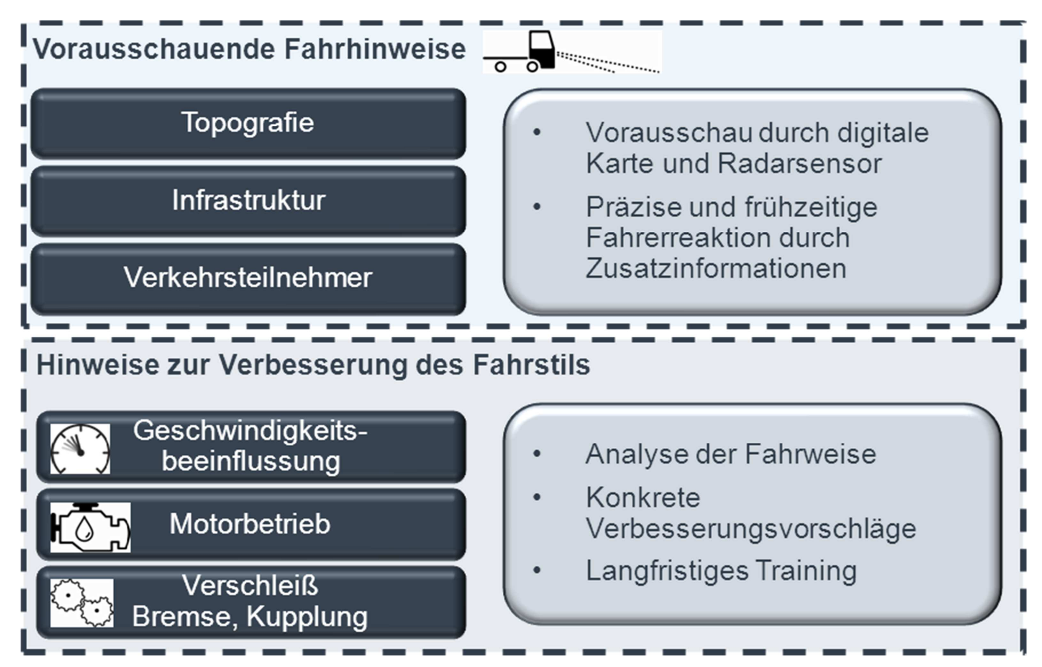


Abbildung 8: Einteilung der Fahrhinweise in vorausschauende Fahrhinweise und Hinweise zur Verbesserung des Fahrstils [Hip13].

III.2 AP2 Fahranalyse

III.2.1 Systematik der Situationseinteilung

Nach FASTENMEIER [Fas95], [Fas07] wurde eine Unterteilung der Gesamtsituation in Verkehrssituation und Fahrsituation vorgenommen, wodurch eine Situationsklassifikation durch Analyse weniger komplexer Teilsituationen ermöglicht wird.

Als Grundlage für die Beschreibung der **Verkehrssituation** wird die Taxonomie nach FASTENMEIER [Fas95] verwendet. Dadurch lassen sich die statischen Elemente der Gesamtsituation systematisch beschreiben.

Eine ähnliche Systematik zur Einteilung von **Fahrsituationen** ist in der Literatur nicht zu finden und muss für den Virtuellen Fahrtrainer entwickelt werden. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf eine modulare Aufteilung gelegt, um Entwicklungen der Projektpartner nahtlos zusammenführen zu können. Hierfür wird das Konzept der Situationsvariablen nach v. BENDA [Ben83] modifiziert. Eine Situationsvariable stellt darin die kleinste, unabhängige Beschreibungseinheit einer Situation dar. Die jeweiligen Situationen können durch Kombination der Ausprägungen ihrer Situationsvariablen vollständig beschrieben werden. Dies hat

den Vorteil, dass die Ausprägungen der Situationsvariablen nur einmalig in einem vorgelagerten Funktionsblock erkannt werden müssen. Die nachgelagerte Situationserkennung muss dann die Situationsvariablen geeignet verknüpfen, um die jeweilige Situation festzulegen.

III.2.2 Durchführung der Fahranalyse

RAUDSZUS [Rau11, S.30] entwickelte im Rahmen des Projekts eine Methode, die Fahranalyse systematisch durchzuführen (Abbildung 9).

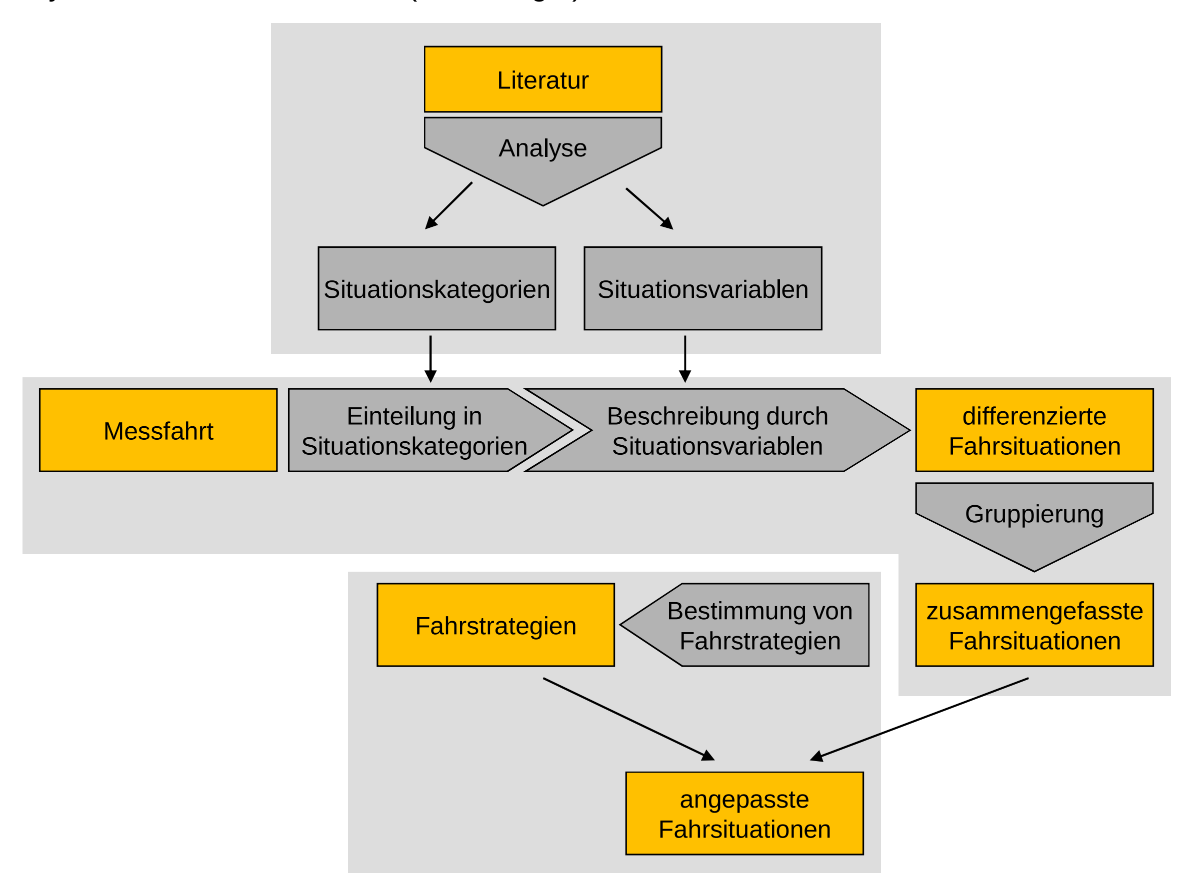


Abbildung 9: Methodisches Vorgehen zur Fahrsituationseinteilung [Rau11, S.31]

Dafür werden zunächst aus der Literatur bekannte Situationseinteilungen analysiert und Situationskategorien und Situationsvariablen abgeleitet. Damit können Messfahrten systematisch eingeteilt und differenzierte Fahrsituationen über die alle auftretenden Kombinationen der Situationsvariablen gefunden werden. Die differenzierten Fahrsituationen werden gruppiert und dadurch zusammengefasste Fahrsituationen gefunden. Im letzten Schritt werden die kraftstoffeffizienten Fahrstrategien mit den zusammengefassten Fahrsituationen abgeglichen und daraus ein endgültiger Satz an angepassten Fahrsituationen gefunden [Rau11, S.31].

Für die Fahranalyse wurde eine Messstrecke ausgewählt, die eine möglichst vollständige Abdeckung unterschiedlicher Fahr- und Verkehrssituationen ermöglicht und mit einer Fernverkehrs-Zugmaschine des Typs MAN TGX 18.440 mit voll beladendem Auflieger befahren (Abbildung 10).

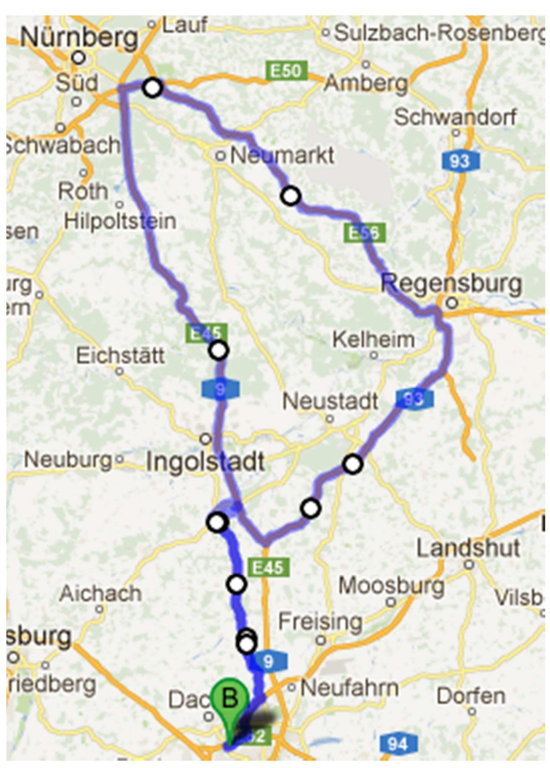


Abbildung 10: Verlauf der Messstrecke [Goo12]

Die Anwendung der Methode wird am Beispiel eines Fahrhinweises bei einer Folgesituation exemplarisch gezeigt. Nach der Literaturanalyse bieten sich für die Beschreibung der relevanten Situationskategorie „Folgen“ die Situationsvariablen

- Beziehung zum Vorderfahrzeug
- Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs
- Beschleunigung des Vorderfahrzeugs
- Überholabsicht

an.

Die Messdaten werden hinsichtlich ihrer Situationsvariablen klassifiziert. Dazu werden die Ausprägungen der Situationsvariablen zu differenzierten Fahrsituationen kombiniert (Tabelle 1). Von den theoretisch 36 möglichen Kombinationsmöglichkeiten treten nur 6 Kombinationen auf der Messstrecke auf (Abbildung 11), wobei die Fahrsituationen 21, 22 und 23 jeweils den Fahrsituationen 18, 19 und 20 zugeordnet werden können.

Tabelle 1: Häufigste Kombinationen von Situationsvariablen in der Situationskategorie Folgen [Rau11, S. 44]

	Beziehung zum VF	Geschwindigkeit des VF	Beschleunigung des VF	Überholabsicht
Fahrsituation 18: *Nahes Folgen*	Nahes Folgen	Hoch	Konstante Geschwindigkeit	Keine Überholabsicht
Fahrsituation 19: *Fernes Folgen*	Fernes Folgen	Gering	Konstante Geschwindigkeit	Keine Überholabsicht
Fahrsituation 20: *Unkonstantes Folgen*	Nahes Folgen	Hoch	Unkonstante Geschwindigkeit	Keine Überholabsicht

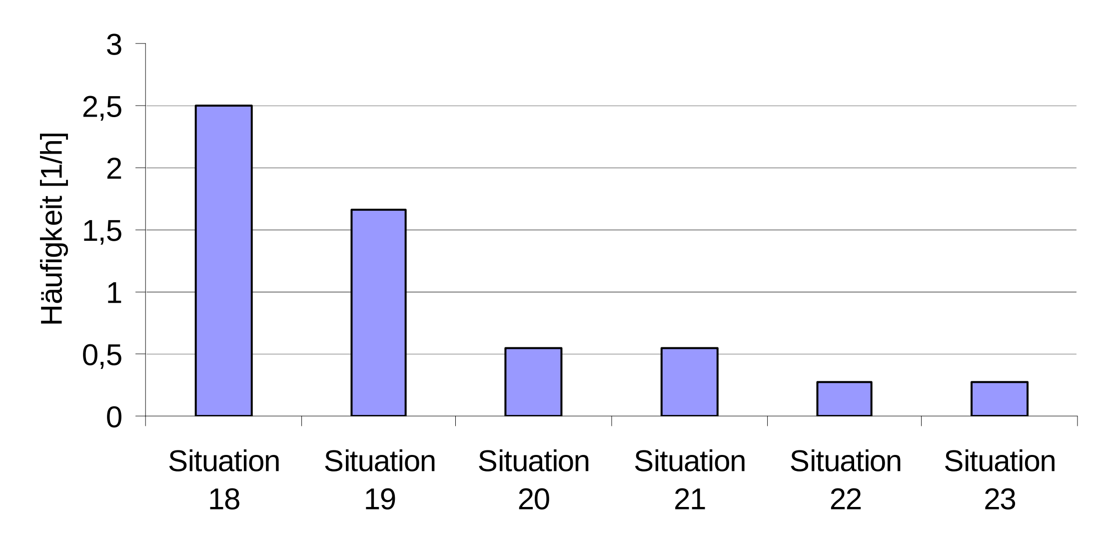


Abbildung 11: Häufigkeit von Fahrsituationen in der Situationskategorie Folgen [Rau11, S.42]

III.3 AP3 Sensorik

Eine Schlüsselfunktion des Virtuellen Fahrtrainers sieht vor, dem Fahrer situationsgerecht prädiktive Anweisungen zu übermitteln. Damit die Ausgabezeitpunkte der Meldungen bestimmt werden können, müssen den Algorithmen des Systems die Steigungsverläufe sowie Infrastrukturinformationen der vorausliegenden Straße zugeführt werden. Daher wird sowohl untersucht, welche Qualität kommerziell angebotene digitalen Karten haben, als auch, welche alternativen Konzepte zur Steigungsermittlung in Zukunft Verwendung finden können.

III.3.1 Topografiedaten

Im Kraftfahrzeug steht mit jeder Bremsung die Umwandlung von mechanischer Energie in thermische Energie am Ende des Energieflusses. Diese Umwandlung ist bei den heute in Lastkraftwagen eingesetzten Betriebs- und Dauerbremsanlagen irreversibel. Der Energieerhaltungssatz fordert, dass diese Bremsenergie zu Beginn in das System eingebracht wird.

Der Energieeintrag erfolgt in der Regel im Verbrennungsmotor durch die Umwandlung von chemischer Energie in mechanische Energie. Mit jeder vermiedenen Bremsung kann also Antriebsenergie und damit Kraftstoff eingespart werden[1].

Dieser in der Theorie einfache Zusammenhang stellt kraftstoffeffizienzbemühte Fahrer in der Praxis vor eine große Herausforderung. Diese resultiert aus der Schwierigkeit die Trägheit des Fahrzeuges richtig einzuschätzen. Die Herausforderung der Trägheitseinschätzung steht entweder im Zusammenhang mit der Absicht des Fahrers seine Geschwindigkeit anzupassen (z. B. Reduktion der Geschwindigkeit aufgrund eines Tempolimits) oder dem Bestreben des Fahrers die Geschwindigkeit äußeren Einflüssen zum Trotz konstant zu halten (z. B. Geschwindigkeit konstant halten trotz Gefälle). Die Trägheit sorgt dafür, dass sich erst verzögert zeigt, ob zuvor zu viel Antriebsenergie abgerufen wurde – nämlich dann, wenn der Fahrer zum Erreichen (Tempolimit) bzw. zum Einhalten (Gefällefahrt) seines Geschwindigkeitswunsches die Bremse betätigen muss.

Energetisch optimal ist also eine Fahrweise, bei der immer nur gerade so viel Antriebsenergie eingesetzt wird, dass auf den Einsatz der Bremse verzichtet werden kann. Vor dem Erreichen eines Tempolimits oder eines Gefälles wird idealerweise genau dann der Eintrag der Antriebsenergie unterbrochen, wenn durch einen Rollvorgang die Zielgeschwindigkeit erreicht werden kann, ohne die Bremse einzusetzen. Da die Unterbrechung des Energieeintrags und damit der Start der Rollphase immer vor dem Zeitpunkt eingeleitet werden muss, an dem die Zielgeschwindigkeit erreicht werden soll, wird eine derartige Fahrweise nachfolgend mit dem Adjektiv „prädiktiv“ beschrieben.

Eine prädiktive, topografieangepasste Fahrweise zeichnet sich durch eine optimale Ausnutzung der kinetischen und potentiellen Energie des Fahrzeugs aus. Die Hinweise des Virtuellen Fahrtrainers zielen dabei darauf ab, frühzeitig Rollvorgänge einzuleiten. Dadurch kann die unnötige Anforderung von Antriebsleistung reduziert bzw. im Idealfall komplett vermieden werden.

Der Steigungsverlauf der Straße hat einen wesentlichen Einfluss auf die Dynamik des rollenden Fahrzeuges. Daher wird zunächst analysiert, welche Anforderungen an die Genauigkeit der Steigungsdaten zu stellen sind. Anschließend wird überprüft, ob kommerziell angebotene digitale Kartendaten diesen Ansprüchen gerecht werden. Zudem liefert eine Recherche Auskunft darüber, ob zukünftig alternative Konzepte zur Steigungsermittlung in Frage kommen, die ggf. auch dort eingesetzt werden können, wo heute noch keine ausreichend genauen Kartendaten vorhanden sind.

III.3.1.1 Anforderungsanalyse zur Genauigkeit von Straßensteigungsdaten

Für die Anforderungsanalyse werden die folgenden zwei Fahrzustände betrachtet. Der erste Fahrzustand ist dadurch gekennzeichnet, dass die Summe der Fahrwiderstände (Summe aus Steigungs-, Luft-, Roll- und Beschleunigungswiderstand) positiv ist. Wird den Fahrwiderständen in diesem Zustand keine Antriebskraft entgegengesetzt, verzögert das Fahrzeug. Dieser Fahrzustand eines positiven Gesamtfahrwiderstands liegt sowohl bei der Fahrt in der Ebene und in Steigungen als auch bei Fahrten auf leichten Gefällestrecken vor.

[1] Dies gilt nicht für das Rollen auf starken bzw. sehr langen Gefällestrecken. Dort erfolgt der Energieeintrag aus der potentiellen Energie.

Kennzeichnend für den zweiten Fahrzustand ist eine negative Summe der Fahrwiderstände aufgrund eines negativen Steigungswiderstands. Ein negativer Steigungswiderstand entspricht einer positiven Hangabtriebskraft. Ist die Hangabtriebskraft gleich oder größer der Summe aus Luft-, Roll- und Beschleunigungswiderstand, kann das Fahrzeug seine Geschwindigkeit halten oder gar vergrößern, ohne dass ein Antrieb durch den Motor notwendig ist. Dieser Fahrzustand eines negativen Gesamtfahrwiderstands tritt im Unterschied zum ersten Fahrzustand ausschließlich bei einem ausreichend starken Gefälle auf (unter Annahme von vernachlässigbaren Windeinflüssen). Ob ein Gefälle ausreichend stark für den Zustand des negativen Gesamtfahrwiderstands und damit für ein unverzögertes, freies Rollen ist, hängt von einer Vielzahl von Größen ab, die ihrerseits die Fahrwiderstände beschreiben. Wichtige Größen sind die aktuelle Geschwindigkeit, der Luftwiderstandsbeiwert und die Stirnfläche, die Fahrzeugmaße sowie der Rollwiderstandsbeiwert. Bei einem typischen, vollbeladenen Lkw ($c_W A$ = 5 m², m = 40.000 kg, f_R = 0,007) ist bei einer Geschwindigkeit von 85 km/h ein Gefälle von mindestens 1,1 % erforderlich, damit das Fahrzeug unverzögert frei rollen kann.

Bei einer prädiktiven, topografieangepassten Fahrweise ist nun erforderlich, die Übergänge zwischen diesen Fahrzuständen energetisch optimal zu gestalten. Dazu empfiehlt es sich vor dem Übergang vom Zustand positiver zum Zustand negativer Gesamtfahrwiderstände, also vor der Einfahrt in ein ausreichend starkes Gefälle, Energie/Geschwindigkeit durch freies Rollen abzubauen, da diese Energie/Geschwindigkeit nach dem Zustandswechsel durch die Hangabtriebskraft im Gefälle wieder aufgebaut wird. Umgekehrt ist es sinnvoll, am Ende des Gefälles und damit vor dem Übergang von negativen zu positiven Gesamtfahrwiderständen den Anteil der kinetischen Energie durch Geschwindigkeitserhöhung zu vergrößern, damit nach dem Gefälle zunächst diese Energie genutzt werden kann, bevor Antriebsleistung vom Motor erbracht werden muss. Vor Gefällen bietet es sich also an, den „Schwung“ auszunutzen, wobei sich die Geschwindigkeit reduziert. Vor dem Ende der Gefällestrecke sollte hingegen durch Geschwindigkeitszunahme „Schwung“ aufgebaut werden.

Für eine Abschätzung der Genauigkeitsanforderungen von digitalen Kartendaten ist der Zustandswechsel von positiven zu negativen Gesamtfahrwiderständen ausschlaggebend. Eine falsche Abschätzung der Rollstrecke und eine Abweichung der angestrebten Zielgeschwindigkeit unmittelbar vor der Beschleunigung aufgrund der Hangabtriebskraft können folgende Beeinträchtigungen verursachen. Neben Akzeptanzproblemen durch den Fahrer kann eine beachtliche Unterschreitung der Soll-Geschwindigkeit vor allem zu einer Behinderung von nachfolgenden Fahrzeugen führen. Der Übergang von negativen zu positiven Gesamtfahrwiderständen ist hingegen für die Genauigkeitsabschätzung von keiner besonderen Relevanz. In der Regel steuern die Fahrer ihre Lkw ohnehin nahe an den gesetzlichen Vorgaben, sodass hier nicht viel Spielraum besteht, die Geschwindigkeit übermäßig zu erhöhen. Daher wird nachfolgend ein Lkw im Zustand eines positiven Gesamtfahrwiderstandes betrachtet.

Dieser Lastkraftwagen befährt eine Steigung in Form einer Rampe, wobei α die reale Steigung beschreibt (Abbildung 12). Zum Zeitpunkt t_0 und bei der Geschwindigkeit V_0 wird der Antrieb entkoppelt, sodass der Lkw aufgrund der Massenträgheit rollt. Dabei wird seine Geschwindigkeit reduziert und erreicht V_1 nach einer Rollstrecke l. Vom Virtuellen Fahrtrainer wird die Zielgeschwindigkeit V_1 vorgegeben und die Rollstrecke auf Basis von digitalen Kartendaten geschätzt: Diese Schätzung hängt also maßgeblich von der Genauigkeit der Kartendaten ab. Daher ist es zweckmäßig, zunächst eine tolerierbare Geschwindigkeit V_1‘ zu

definieren, woraus sich dann wiederum eine tolerierbare Differenz α‘ des Steigungswinkels ableiten lässt.

Um eine Abschätzung der tolerierbaren Steigungsdifferenz α‘ zu erhalten, werden simulativ verschiedene Ausrollvorgänge betrachtet. Um das Längsdynamikmodell des FTM in Hinsicht auf Rollvorgänge zu validieren, sind Ausrollversuche auf der MAN Teststrecke vorgenommen wurden. Dabei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Versuchsfahrzeug.

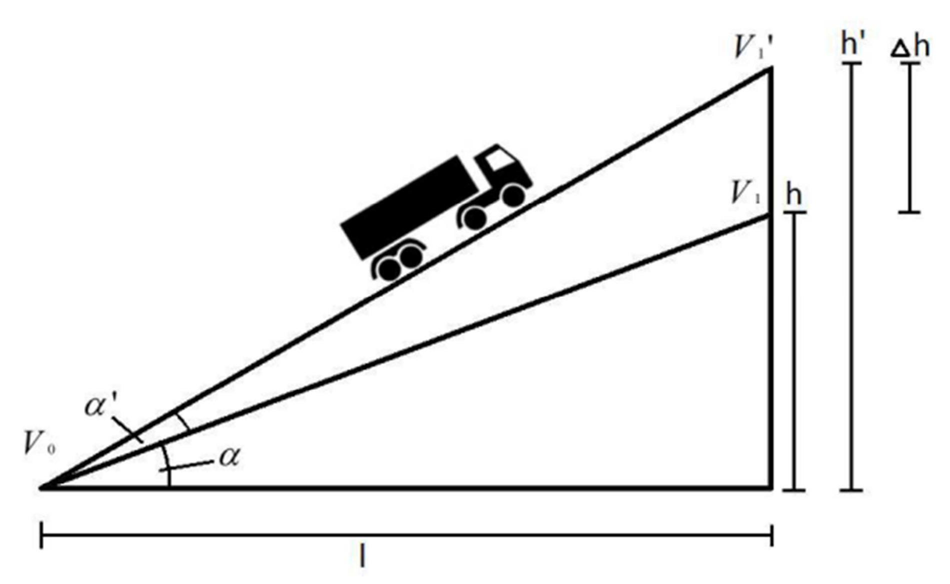


Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Steigungsfahrt eines Lastkraftwagens

Abbildung 13 zeigt Simulationsergebnisse für die tolerierbare Steigungsabweichung eines vollbeladenen Lkw ($c_W A$ = 5 m², m = 40.000 kg, f_R = 0,007) über der realen Steigung bei verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten. Die Zielgeschwindigkeit V_1 wurde für alle betrachteten Fälle 10 km/h niedriger als die Ausgangsgeschwindigkeit V_0 gewählt. Dies stellt eine relativ große Spreizung zwischen V_0 und V_1 dar, sodass eine darauf beruhende Genauigkeitsabschätzung eine große Robustheit aufweisen sollte. Das Toleranzniveau der Abweichung zwischen Soll-Zielgeschwindigkeit V_1 und Ist-Zielgeschwindigkeit V_1‘ bei vorliegendem Steigungsfehler α‘ beträgt 1 km/h.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender realer Steigung α der absolute Fehler α‘ in den Steigungsdaten vom Betrag her ebenfalls zunehmen darf. Dieser Anstieg ist für α bis 10 % nahezu linear. Zudem nimmt die tolerierbare Steigungsabweichung α‘ mit zunehmenden Angangsgeschwindigkeiten V_0 ebenfalls zu. Für eine Abschätzung des zulässigen absoluten Fehlers ist in erster Linie ein Anfangsgeschwindigkeitsbereich von 60 km/h bis etwa 90 km/h von Interesse, da bei Geschwindigkeiten unter 60 km/h eine topografieangepasste Fahrweise z. B. aus Akzeptanzgründen nur noch bedingt zweckmäßig ist. Für die erforderliche Genauigkeit ist außerdem der Straßenneigungsbereich bis etwa 1 % von hoher Relevanz. Um von einer Anfangsgeschwindigkeit von 60 km/h durch Rollen vor der Einfahrt in ein Gefälle die Geschwindigkeit auf 50 ± 1 km/h zu reduzieren, sind die Steigungsdaten notwendig, die im Mittel nicht mehr als etwa ±0,085 % von der tatsächlichen Straßenneigung abweichen.

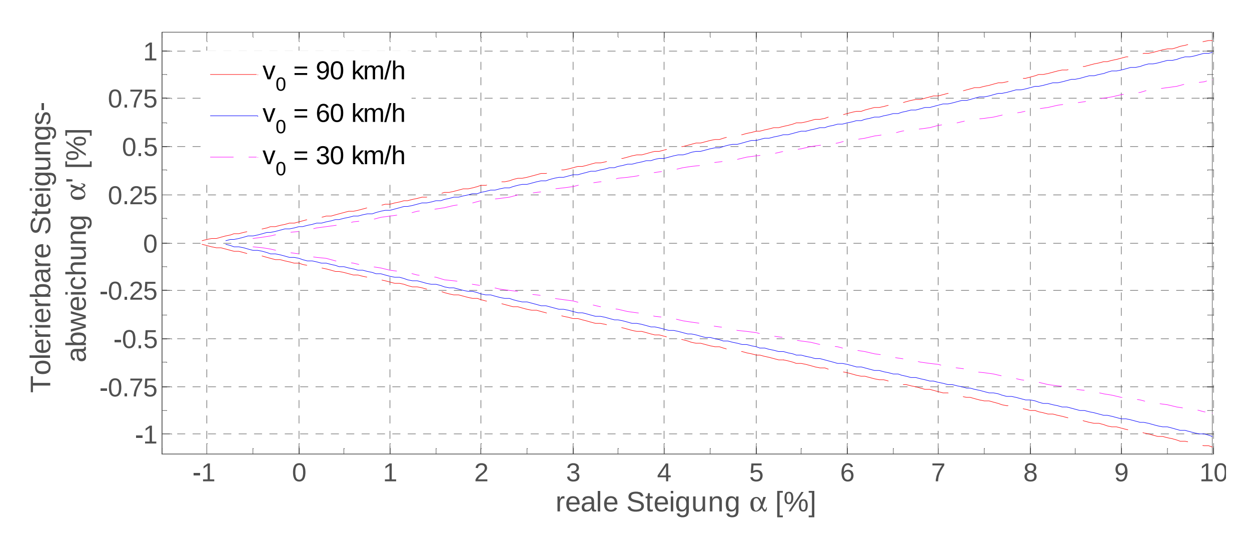


Abbildung 13: Tolerierbare Steigungsabweichung α‘ als Funktion der realen Steigung α bei verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten V_0 (Zielgeschwindigkeit $V_1 = V_0 - 10$ km/h, Toleranzniveau für Zielgeschwindigkeit $|V_1' - V_1|$ = 1 km/h, $c_W \cdot A$ = 5 m², m = 40.000 kg, f_R = 0,007)

In der vorliegenden Untersuchung wurde mit 10 km/h eine recht große Geschwindigkeitsspreizung zwischen Ausgangs und Zielgeschwindigkeit sowie eine recht strikte tolerierbare Abweichung von 1 km/h von dieser Zielgeschwindigkeit gewählt. Daher kann allgemein empfohlen werden, dass Steigungsdaten Genauigkeitsanforderungen mit einem durchschnittlichen Steigungsfehler von weniger als ±0,1 % (≈ ±0,0573°) aufweisen sollten, um eine topografieangepasste Fahrweise eines Lastkraftwagens zu ermöglichen. Aufgrund des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen der Steigungsangabe in Prozent und in Grad, entsprechen 0,1 % unterschiedlichen absoluten Werten der Steigungsabweichung in Grad. Bei einer tatsächlichen Steigung von 0 % entsprechen ±0,1 % Abweichung ca. ±0,057 °, wohingegen bei einer tatsächlichen Steigung von 20 % eine Abweichung von ±0,1 % ca. ±0,055 ° entspricht. Da Steigungen von mehr als 20 % extrem selten sind, stellen ±0,055 ° eine zweckmäßige Vorgabe der Genauigkeitsanforderungen an den durchschnittlichen Steigungsfehler dar.

III.3.1.2 Abdeckung

Die in dem Kartenmaterial zur Verfügung stehenden Steigungsdaten werden einer Offline-Analyse unterzogen. Ziel der Untersuchung ist es, die Genauigkeit und die Abdeckung von Steigungsdaten zu beurteilen. Hierzu werden Referenzdaten mit einer hochgenauen Kreiselplattform aufgenommen und mit den Steigungsdaten einzelner digitaler Karten verglichen.

Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse dieser Offline-Analyse. Obwohl zum Zeitpunkt der Erhebung (Quartal 4 2010) Teile des Streckennetzes noch nicht abgedeckt sind, wird davon ausgegangen, dass die Kartenanbieter diese Lücken mittelfristig schließen werden.

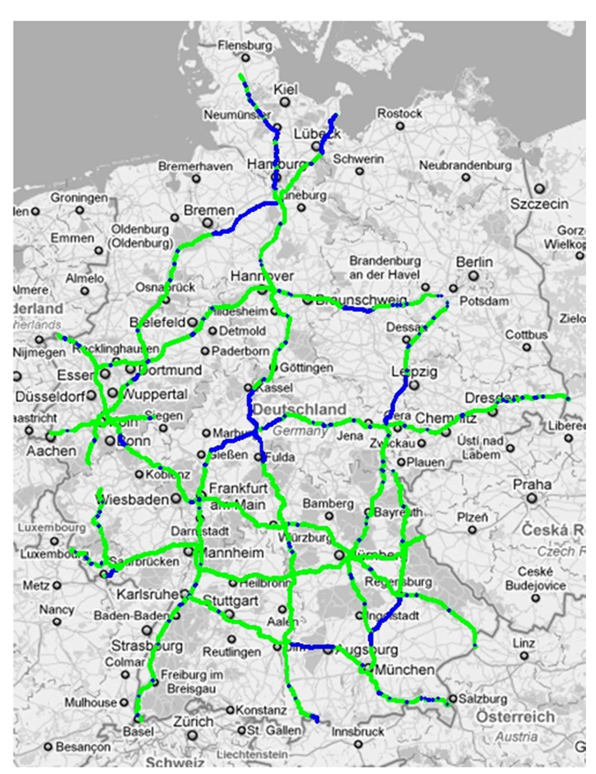


Abbildung 14: Ergebnis einer Offline-Analyse von Kartenmaterial zur Bestimmung der Verfügbarkeit von Steigungsdaten auf einem Teil des deutschen Autobahnnetzes. Abschnitte in blauer Farbe stellen Datenlücken dar.

III.3.1.3 Steigungsgenauigkeit

In weiteren Untersuchungen werden die bisher nur offline analysierten digitalen Kartendaten in einen Versuchsträger integriert und die echtzeitfähige Bereitstellung der vor dem Fahrzeug liegenden Topografie erprobt.

Hierzu wurden zwei fahrzeugtaugliche Steuergeräte, die jeweils auf unterschiedliche kommerziell erhältliche Datenbasen zurückgreifen, in einen Versuchsträger integriert. Damit können die Daten der beiden derzeit am Markt befindlichen relevanten Kartendatenhersteller direkt verglichen werden.

Die Steuergeräte werden über den neuen Standard ADASISv2 an die Fahrzeuginfrastruktur angekoppelt. ADASISv2 ist eine Spezifikation eines Protokolls, um den vorausliegenden Straßenverlauf, insbesondere die Fahrbahnsteigung, mittels definierter Attribute zu charakterisieren. Für die Bereitstellung der Steigungsdaten für die Funktionen des Virtuellen Fahrtrainers wurde ein ADASISv2-Rekonstruktor entwickelt, der das Protokoll interpretiert und es für weitere Berechnungen zugänglich macht.

Für die Bewertung der Steigungsdaten wurden die funktionalen Anforderungen an die Steigungsdaten in Expertengesprächen definiert und die Auswertung wird dahingehend abgestimmt. Demnach muss ermittelt werden, auf welchem Streckennetz die Steigungsdaten bereitgestellt werden können und ob vor allem die im Fernverkehr befahrenen Strecken abgedeckt sind. Diese Information dient der Abschätzung des Wirkpotentials der vorausschauenden Fahrzeugfunktionen und damit auch der Argumentation gegenüber dem Kunden.

Die auf den Strecken vorhandenen Steigungsdaten müssen in einer für die Fahrzeugfunktionen ausreichenden Genauigkeit vorliegen. Dabei ist nicht nur die Abweichung der Steigungsdaten bezüglich einer Referenz von Bedeutung, sondern es ist ebenso wichtig, dass die Position von topografischen Elementen wie Kuppen und Senken richtig zugeordnet wird. Im Hinblick auf zeitkritische Anwendungen gilt es ferner zu untersuchen, wie schnell Steigungsdaten nach dem Verlassen der von den Steuergeräten vorausberechneten Route bereitgestellt werden können.

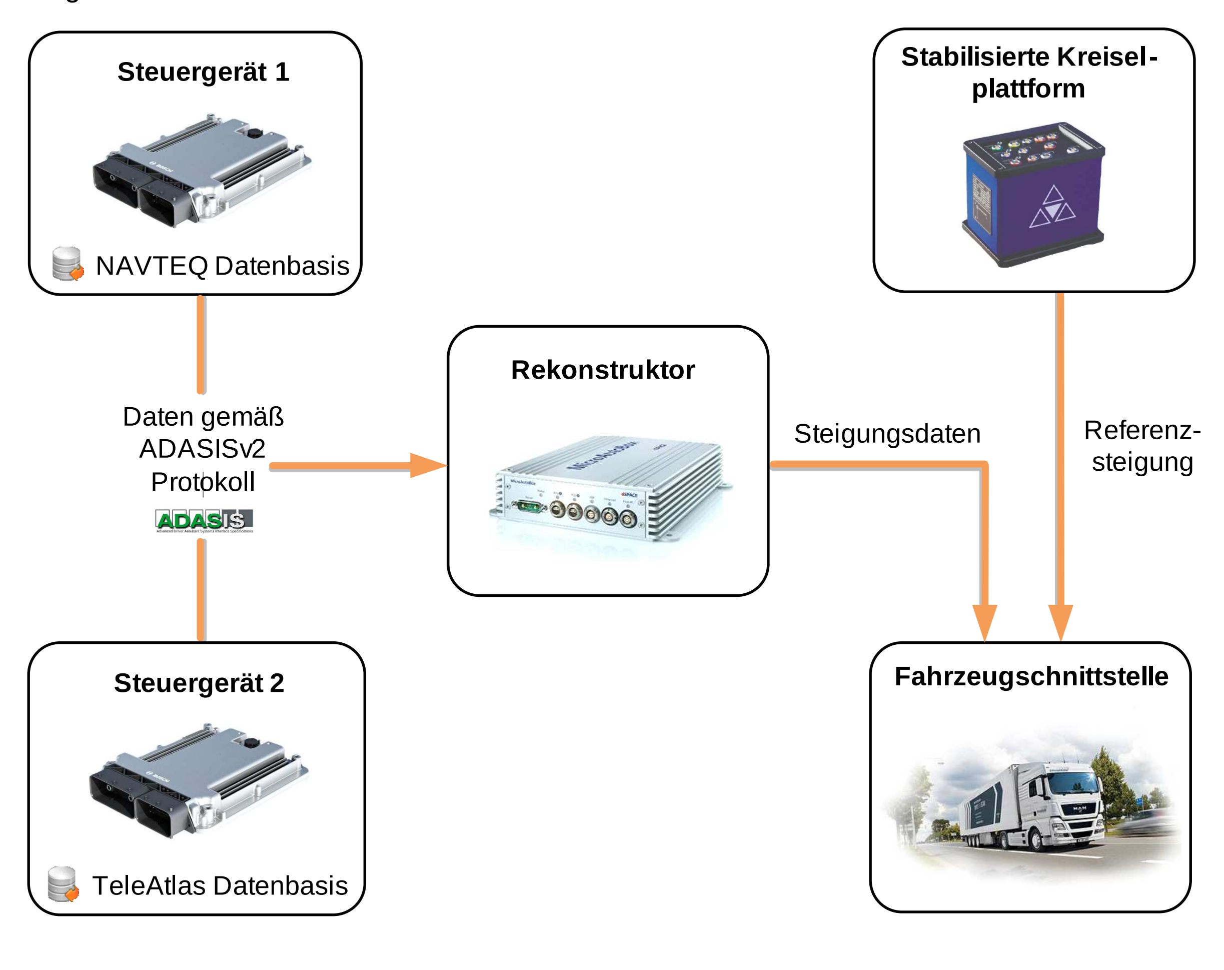


Abbildung 15: Vernetzung der Steuergeräte im Versuchsträger. Die Datenbanken der Kartenhersteller werden durch Softwareroutinen gemäß dem ADASISv2-Protokoll in den Steuergeräten codiert und mittels CAN-Bus übertragen. Der entwickelte Rekonstruktor interpretiert diese Daten und gibt sie in für die Anwendung aufbereiteter Form an das Fahrzeug weiter.

Zur Referenzmessung werden derzeit typische Fernverkehrsstrecken mit dem Versuchsträger abgefahren und mittels einer mit DGPS stabilisierten Kreiselplattform hochgenaue Referenzdaten aufgenommen. Für die Überprüfung wurden Messfahrten über eine Strecke von circa 4000 km durchgeführt, wobei für ca. 3000 km auswertbares Datenmaterial gewonnen werden konnte.

Abbildung 16 zeigt die prozentuale Aufteilung der gefahrenen Strecke untergliedert nach den einzelnen Kategorien. Insbesondere der Autobahnanteil entspricht mit 80 % ungefähr dem

Einsatzprofil des nationalen Fernverkehrs laut Umfrage des Bundesverbandes für Güterkraftverkehr, Entsorgung und Logistik e.V.

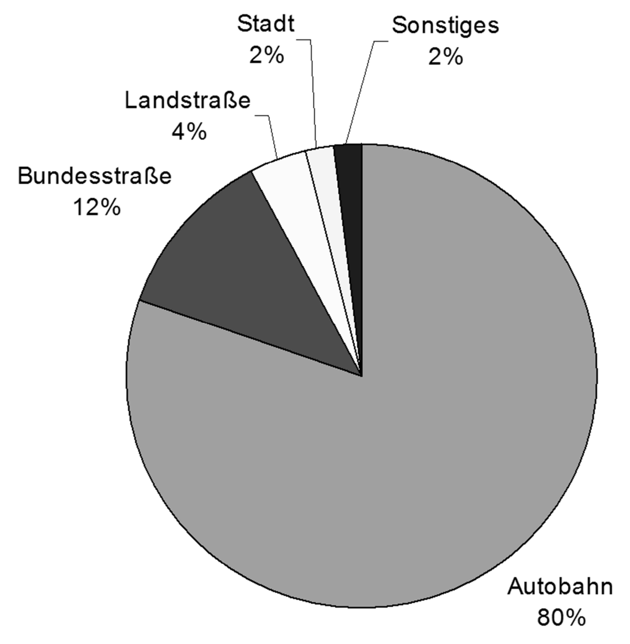


Abbildung 16: Prozentuale Zusammensetzung der gefahrenen Strecke

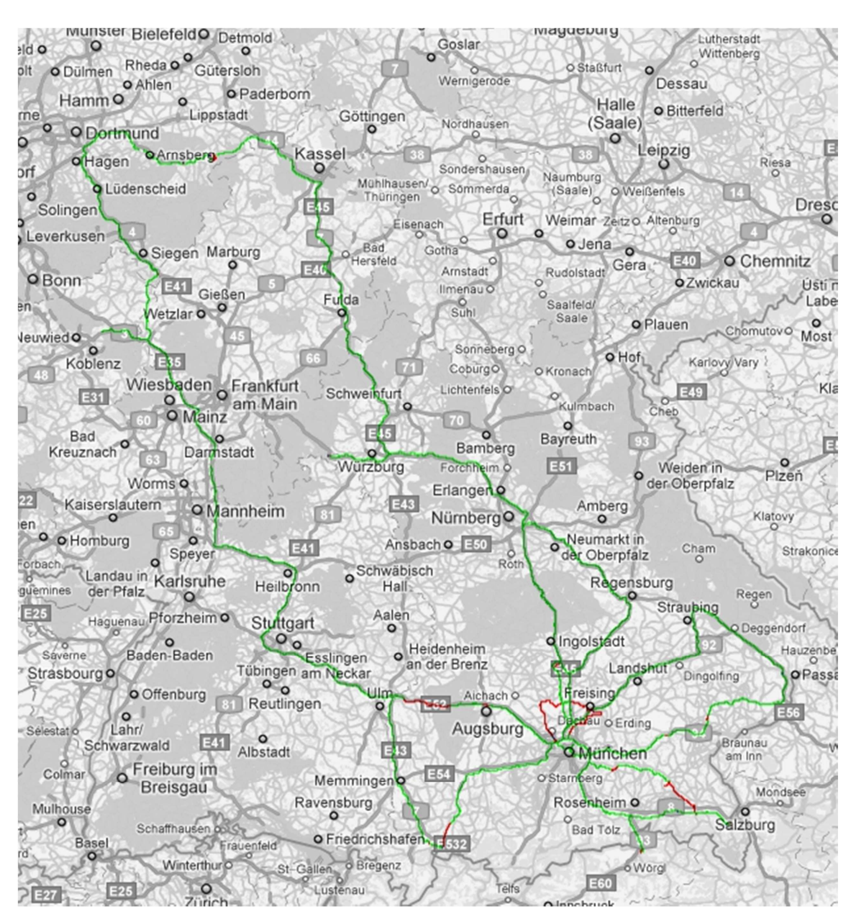


Abbildung 17: Streckenabdeckung der Steigungsdaten (grün: Steigungsdaten verfügbar, rot: keine Steigungsdaten verfügbar)

III.3.1.4 Alternative Sensorkonzepte zur Ermittlung von Straßensteigungen

Obwohl, wie zuvor gesehen, kommerzielle Anbieter für Mitteleuropa bereits überaus präzise Steigungsdaten anbieten, die den Anforderungen eines topografieangepassten Fahrens gerecht werden, gibt es Szenarien, in denen die Generierung von Steigungsdaten relevant sein kann. So ist nicht davon auszugehen, dass in absehbarer Zeit derartige Daten flächendeckend für großflächige Schwellenländer zur Verfügung stehen (z. B. China, Brasilien, Russland). Möchte ein Nutzfahrzeughersteller seine Fahrzeuge auf diesen Märkten ebenfalls mit topografieangepassten Assistenzsystemen ausstatten, so muss er einen Weg finden, im Fahrzeug Steigungsdaten bereitzustellen.

Dies kann dadurch erfolgen, dass er seine Fahrzeugflotte mit entsprechender Sensorik ausstattet, um Steigungsdaten zu sammeln. Zum einen können die Daten auf einem lokalen Speicher im Fahrzeug abgelegt werden, die dann bei Werkstattbesuchen ausgelesen werden. Hier ist allerdings davon auszugehen, dass ein sehr hoher Speicherbedarf bestehen wird. Zum anderen können die Daten auf kleineren Zwischenspeichern im Fahrzeug gepuffert werden und dann über Datennetzverbindungen an einen Server übermittelt werden. Anschließend können die Daten der Fahrzeugflotte ausgewertet, bearbeitet und dann in geeigneter Form den topografieangepassten Assistenzsystemen zur Verfügung gestellt werden.

Zur Messung von Straßensteigungen werden in der Regel Neigungsmesser, auch Klinometer oder Inklinometer, herangezogen. Neigung ist definiert als „die relative Lage einer Richtung in Bezug auf die Horizontale bzw. auf die Lotrechte“ [Her12, S. 259]. Die verschiedenen Inklinometer nutzen sowohl unterschiedliche physikalische Effekte als auch verschiedene Messprinzipien aus. Zur Neigungsermittlung kommen zudem Sensoren in Frage, die andere Größen ermitteln, wie z. B. die Höhe, woraus dann Rückschlüsse auf den Steigungsverlauf gezogen werden können.

Zur Neigungsermittlung mithilfe der Fahrzeugflotte eines Lastkraftwagenherstellers sollte das Sensorkonzept folgende Anforderungen erfüllen:

- Relative Steigungsgenauigkeit von min. ±0,055° zwischen zwei Messpunkten.
- Neigungsmessung unabhängig von Beschleunigungen des Fahrzeugs.
- Robustheit gegenüber fahrzeugtypischen Vibrationen.
- Robustheit gegenüber fahrzeugtypischen Temperaturschwankungen.
- Günstig implementierbar.

Tabelle 2 gibt einen Überblick der Rechercheergebnisse hinsichtlich verschiedener Sensorkonzepte sowie deren Vor- und Nachteile [Jus12]. Rotationssensoren kommen prinzipbedingt für einen Einsatz im Fahrzeug nicht in Frage, da sie eine mechanische Verbindung zum Bezugssystem benötigen. Auch Gravitationssensoren erscheinen eher ungeeignet. Entweder reagieren sie sensibel auf Temperaturänderungen (DMS-Biegebalkensensoren) oder für Vibrationen (magnetoresistive Sensoren). Auch elektrolytische Sensoren, die nach dem Wasserwaagenprinzip arbeiten, werden typischerweise in vibrationsarmen Umgebungen eingesetzt. Der Kompass-Sensor ist grundsätzlich für einen Einsatz im Fahrzeug geeignet, allerdings ist er empfindlich gegenüber magnetischen Störungen und besitzt nur eine mäßige Auflösung.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Sensorkonzepten zur Neigungsermittlung (eigene Darstellung nach Recherche durch [Jus12])

Rotationssensor	**Messsystem starr mit Bezugssystem verbunden**
	- für Fahrbahnneigungsmessung ungeeignet
Gravitationssensoren	
DMS-Biegebalkensensoren	**Masse sitzt auf Balken mit Dehnungsmess-Streifen (DMS)**
	- temperaturabhängig - abhängig von Güte der Klebung des DMS auf Prüfling + hohe Auflösung
Magnetoresistive Sensoren	**Änderung des Widerstandes durch Magnetfeld**
	- nicht einsetzbar bei starken magnetischen Störungen Auflösung: 0,005 ° [Her12, S. 264]
Elektrolytische Sensoren	**Oberflächen von Flüssigkeiten stets horizontal**
	- temperaturabhängig wegen Elektrolyt - nur für erschütterungsfreie Einsatzorte Auflösung: 0,001 ° [Her12, S. 264]
Kompass Sensor	**Orientierung am Magnetfeld**
	- sehr stark beeinflussbar von magnetischen Störungen Auflösung: 0,1 ° [Her12, S. 264]
Wärmesensoren	**Messen Temperaturunterschiede**
Konvektionsströmungssensor	- störanfällig für externe Wärmequellen + keine beweglichen Teile + hohe Sensitivität Auflösung: 0,007 ° [Hes12, S. 310]
Thermodynamischer Sensor	- störanfällig für externe Wärmequellen - Zeitverzögerung durch Wärmesensoren - noch nicht kommerziell erhältlich + keine beweglichen Teile
Gyroskop	**Misst Änderung des Drehimpulses**
	- schnell rotierende bewegliche Teile + Genauigkeit
Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)	**Realisierung eines Messsystems auf kleinstem Raum**
	+ günstig + temperaturunabhängig + sehr klein Auflösung: 0,005 ° [Her12, S. 264]
Barometer	**Misst Änderung des Luftdrucks**
	- Abhängigkeit von Luftdruckschwankungen + keine Beeinflussung durch Beschleunigung Relative Genauigkeit: ±1 m [Bos13, S. 6]
Nichtlinearer Zustandsbe-obachter	**Berechnet Neigung mithilfe eines Fahrdynamikmodells**
	- störungsempfindlich + Verwendbarkeit von Seriensensorik Auflösung: < 0,045 ° [Hal03]
GPS	**Ortung durch Satellitensignale**
	- nur Messung wenn Verbindung zu genügend Satelliten besteht + unabhängig von Beschleunigungs-, Vibrations- u. Wärmeeinflüssen Genauigkeit: < 77 m zu 95 % [Ass01, S. 13]

Wärmesensoren stellen ein vielversprechendes Sensorkonzept dar. Sie besitzen keine beweglichen Teile, sodass sie robust gegenüber Änderungen in der Fahrzeugbeschleunigung sind, sowie eine hohe Genauigkeit. Derartige Sensoren sind bisher allerdings kaum verfügbar, sodass sie ihre Praxistauglichkeit noch unter Beweis stellen müssen.

Konventionelle Gyroskopsensoren sind aufgrund ihrer Kosten für den Flotteneinsatz ungeeignet. Werden derartige Gyroskopfunktionen jedoch mit sogenannten Mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) abgebildet, so sind diese aus mehreren Gründen aussichtsreich: Sie sind genau, kostengünstig und sehr klein. Dies erklärt die bereits große Marktdurchdringung von MEMS in der Konsumerelektronik. Die indirekte Ermittlung von Straßenneigungen mittels barometrischer Höhenmessung ist ein interessanter Ansatz, jedoch muss dazu die Genauigkeit noch weiter erhöht werden. Eine Genauigkeit von ±1 m führt zu einem Steigungsfehler von ±1 % bei einem Messpunktabstand von 100 m. Wird der Messpunktabstand verringert, erhöht sich der Steigungsfehler sogar (z. B. ±2 % bei 50 m). Wird der Messpunktabstand vergrößert, so ist fraglich, ob eine ausreichende Auflösung im Steigungsprofil erzielt werden kann.

Auch wenn der nichtlineare Zustandsschätzer sehr störungsanfällig ist (z. B. hinsichtlich Änderung des Windes, Straßenbeschaffenheit, Niederschlag; Fahrzeugmasse) und bisher noch nicht die Genauigkeitsanforderungen erfüllt, nutzt er ausschließlich bereits im Fahrzeug verbaute Sensoren. Diese Sensoren und Methoden der Fahrzeugmodellierung können daher herangezogen werden, um die Messungen anderer Sensorkonzepte zu plausibilisieren. Ähnliche Vorteile bietet ebenfalls die Neigungsermittlung mittels GPS. Als alleiniges Konzept zur Neigungsmessung ist die GPS-basierte Positionsbestimmung bei der aktuellen Genauigkeit als ungeeignet einzustufen. Aufgrund der kostengünstigen Verfügbarkeit von GPS-Receivern kann dieses Messprinzip allerdings andere Sensorkonzepte ergänzen.

Ohnehin ist davon auszugehen, dass kein Sensorkonzept alleinig die Anforderungen zur Neigungsmessung im Flotteneinsatz erfüllen kann. Vielmehr ist zu empfehlen, mehrere Sensoren zu fusionieren und zu einer integrierten, robusten Lösung zusammenzuführen. Aussichtsreich erscheint eine GPS-Positionsbestimmung in Kombination mit einer Neigungsmessung mittels MEMS sowie der Verwendung eines Fahrdynamikmodells zur Datenaufbereitung von Seriensensorik. Darüber hinaus sollte überprüft werden, ob Wärmesensoren zur Neigungsermittlung im Fahrzeug geeignet sind.

III.3.2 Infrastrukturdaten

In einem ersten Schritt wurden die geschwindigkeitsbeeinflussenden Infrastrukturelemente auf einer etwa 400 km langen repräsentativen Referenzstrecke messtechnisch erfasst. Dabei konnten 260 für infrastrukturbedingte Geschwindigkeitsbegrenzungen bestimmt werden (Abbildung 18).

Dabei ist ein Teil der Situationen nicht für schwere Nutzfahrzeuge relevant. Liegen die Geschwindigkeitsbegrenzungen nicht unter den gesetzlich vorgeschriebenen Höchstgeschwindigkeiten (Autobahn 80 km/h, Überlandstraße 60 km/h), stellen diese keine zusätzliche Einschränkung dar. Ebenfalls haben vorfahrtsberechtigte, schildergeregelte Kreuzungen in der Regel keinen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl. Von den verbleibenden Situationen lässt sich ein weiterer Teil mittels statischen Kartenmaterials nicht erkennen. Dies betrifft insbesondere ampelgeregelte Kreuzungen, die nur dann sicher als geschwindigkeitsbeeinflussend erkannt werden können, wenn ein Abbiegevorgang abzusehen ist.

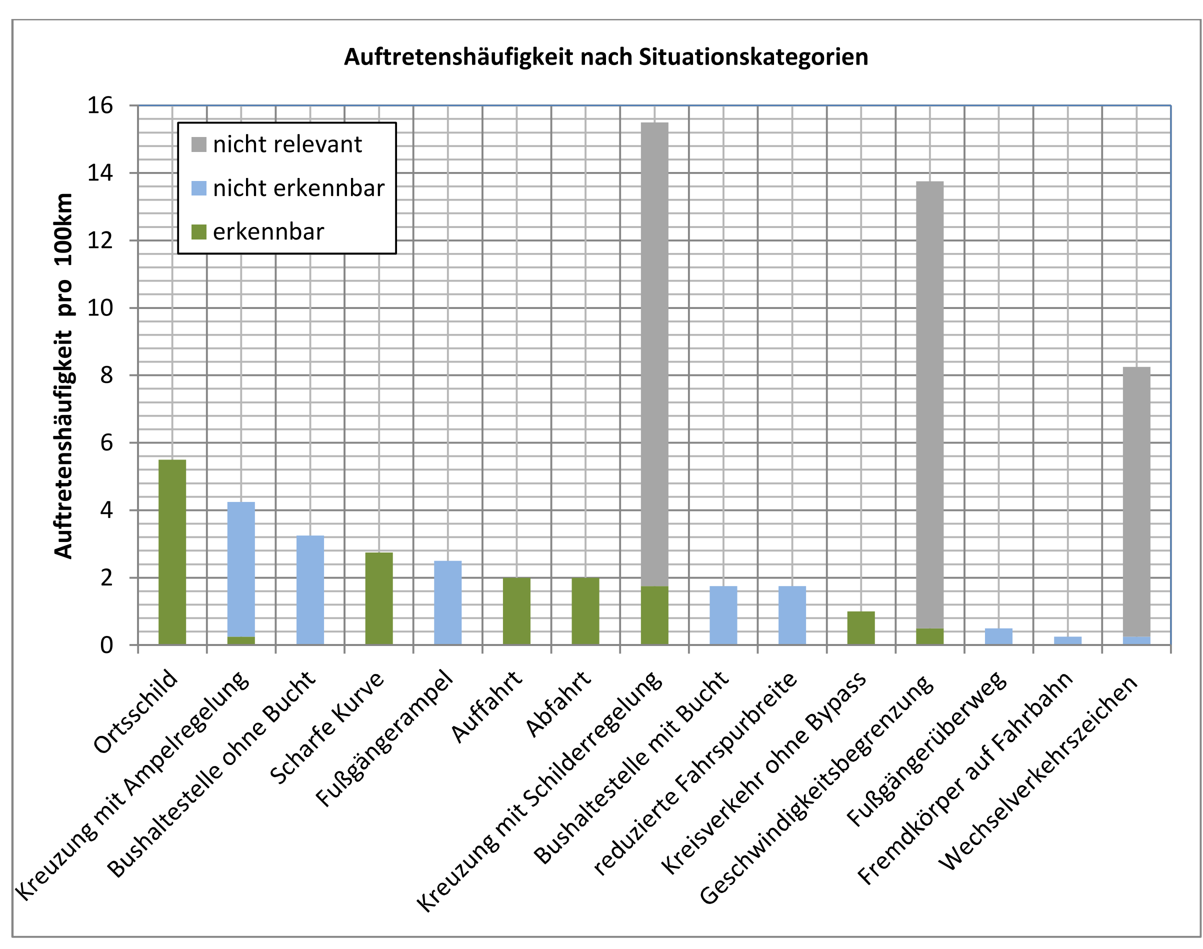


Abbildung 18: Verteilung der aufgetretenen Situationskategorien infrastrukturbedingter Geschwindigkeitsbegrenzungen und ihre Einteilung in Situationen, die keine zusätzliche Geschwindigkeitseinschränkung darstellen (grau), nicht mit derzeitigem statischem Kartenmaterial erkennbar sind (blau) oder die mit den Attributen des statischen Kartenmaterials eine Prädiktion der Höchstgeschwindigkeit zulassen (grün).

Ebenso lassen dynamisch genutzte Infrastrukturelemente, wie Bushaltestellen, Fußgängerampeln und Fußgängerüberwege, keine Prädiktion der Höchstgeschwindigkeit zu. Denkbar ist, dass zukünftig Fahrspurverengungen in statischen Karten abgelegt werden. Jedoch sind sie in den derzeit kommerziell erhältlichen Daten nicht enthalten.

Für die verbleibenden Situationen stellt das statische Kartenmaterial Attribute bereit, die es erlauben, eine Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit zu prädizieren:

- **Ortsschild/Geschwindigkeitsbegrenzung**: Ortsschilder und unter der generell zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegende Geschwindigkeitsbegrenzungen werden zur Bestimmung der Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit herangezogen.
- **Abbiegevorgang**: Kann aus der navigierten Route abgeleitet werden, dass an einer vorausliegenden Kreuzung ein Abbiegevorgang zu erwarten ist, so wird die Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit für den Abbiegevorgang in Abhängigkeit des Abbiegewinkels ermittelt.

- **Stoppschild**: Wird die Vorfahrt eine schildergeregelte Kreuzung durch ein Stoppschild geregelt, kann das Fahrzeug frühzeitig an eine niedrige Geschwindigkeit herangeführt werden.
- **Scharfe Kurve**: In Abhängigkeit des Kurvenradius lässt sich die Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit ableiten.
    - Kreisverkehr: Ein Kreisverkehr stellt einen Sonderfall einer engen Kurve dar, auf den der Fahrer gesondert hingewiesen wird.
    - Abfahrt: Bei Abfahrten wird die Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit vom Kurvenradius am Ausgang des Verzögerungsstreifens bestimmt. Hierbei muss die Ausrollstrategie die Nutzung des Verzögerungsstreifens mit einbeziehen, um Behinderungen nachfolgender Fahrzeuge zu vermeiden.
    - Auffahrten: Auffahrten werden analog einer scharfen Kurve behandelt.

III.4 AP4 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Akzeptanz eines virtuellen Fahrtrainers hängt maßgeblich von der Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ab. Nur wenn der Fahrer die Hinweise als motivierend und nicht als störend oder bevormundend empfindet, wird er auch bereit sein, sie zu befolgen. Daher werden zuerst die Anforderungen der Fahrer ermittelt, um daraus die Meldungsinhalte zu gestallten. Die Integration ins Fahrzeug erfolgt über ein tertiäres Display.

III.4.1 Sammlung von Anforderungen

Für die Bestimmung von Anforderungen für die Schnittstellengestaltung wird im ersten Schritt ein grundlegendes Verständnis der Beweggründe für die Nutzung des Virtuellen Fahrtrainers durch eine qualitative Studie geschaffen.

Es ist davon auszugehen, dass ein technisches System zur Unterstützung der wirtschaftlichen Fahrweise nur dann dauerhaft genutzt wird, wenn es einen langfristigen Nutzen verspricht. Um zu einem Verständnis für die Beweggründe für die Nutzung zu gelangen, wird von Kornberger [Kor12] im Rahmen des Projekts ein strukturiertes Expertengespräch in Form einer Fokusgruppe mit den zukünftigen Systemnutzern durchgeführt. Diese Art der qualitativen Studie bewährt sich vor allem, wenn zu einem spezifischen Thema die Gedanken und Gefühle von Personen identifiziert und Meinungen, Einstellungen, Wahrnehmungen und Ideen gesammelt werden sollen [Kor12, S.40], [Kru94].

Für die Fokusgruppe werden 5 Berufskraftfahrer und 1 Spediteur eingeladen und die folgenden Fragestellungen diskutiert:

- Wie ist die generelle Einstellung der Teilnehmer zum Virtuellen Fahrtrainer?
- In welchen Fahrsituationen ist eine Unterstützung besonders sinnvoll?
- Welche Faktoren beeinflussen die Motivation ein solches System zu nutzen?

Die insgesamt dreistündige Diskussion wird durch Mitschriften sowie Audio- und Videoaufnahmen dokumentiert.

Bei der Ermittlung der generellen Einstellung zu einem virtuellen Fahrtrainer wird vom Konstrukt der wahrgenommenen Nützlichkeit ausgegangen. Nach Davis [Dav89, S.319f] beschreibt es *„das subjektive Empfinden einer Person, dass die Anwendung einer Technologie ihre Arbeitsleistung verbessert“.* Mehrere Autoren [Hsu07, S.1642ff], [Moo01, S.217ff],

[Ven00, S.186ff] sehen darin den zentralen Aspekt der extrinsischen Motivation und schreiben der wahrgenommenen Nützlichkeit eine große Vorhersagekraft für die Nutzung von Systemen zu [Kor12].

Demnach ist bei der Entwicklung des Virtuellen Fahrtrainers eine Maximierung der wahrgenommenen Nützlichkeit anzustreben. Um aus dem Konstrukt der wahrgenommenen Nützlichkeit Aussagen für die Gestaltung des Virtuellen Fahrtrainers zu gewinnen, werden die Determinanten der wahrgenommenen Nützlichkeit gemäß dem Technikakzeptanzmodell [Ven00, S.186ff] bestimmt (Abbildung 20).



Abbildung 19: Teilnehmer der Fokusgruppe [Kor12].

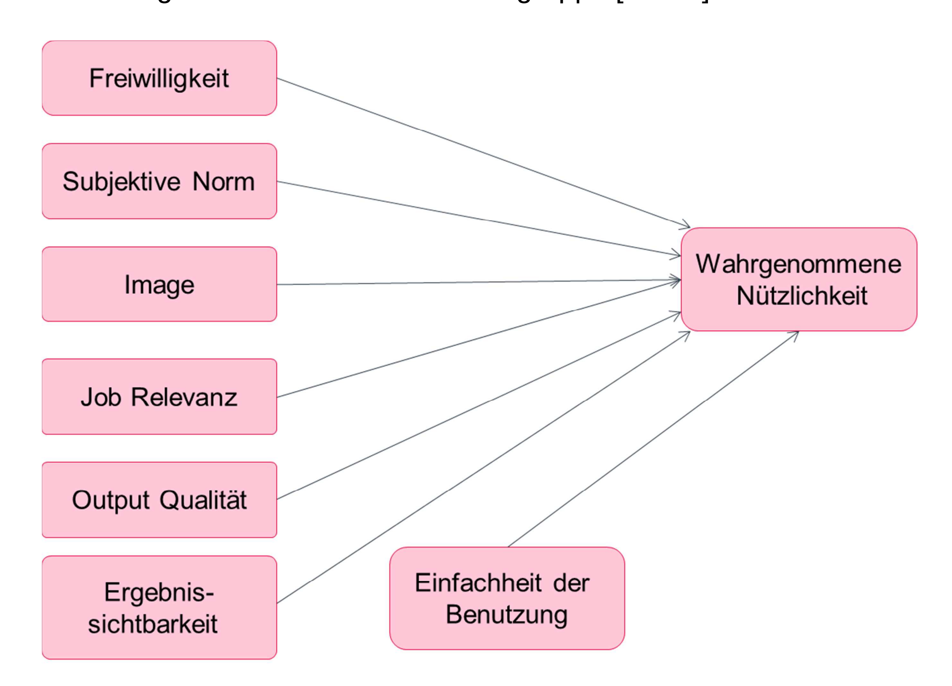


Abbildung 20: Technikakzeptanzmodell [Ven00, S.186ff].

Die Determinanten der wahrgenommen Nützlichkeit werden durch die Teilnehmer der Fokusgruppe während der Diskussion bewertet. Dabei lässt sich feststellen, dass den sozialen Faktoren wie subjektive Norm, Freiwilligkeit oder Image nur eine kleine Rolle beigemessen wird. Insbesondere der Aspekt der Freiwilligkeit wird nicht hinterfragt, sondern eine Nutzung

des Systems als Pflichtaufgabe angesehen. Wesentlich sind dagegen die instrumentellen Faktoren:

- **Job-Relevanz:** Den Fahrern ist bewusst, dass sie durch ihre Fahrweise Einfluss auf die Kosten ihres Arbeitgebers nehmen. Jedoch wird dies nur dann für sie „job-relevant", wenn der Arbeitgeber auf eine wirtschaftliche Fahrweise Wert legt und dies auch überprüft und gegebenenfalls sanktioniert.
- **Output-Qualität:** Die Qualität der Systemmeldung ist zentral und wird verstanden als Präzisionsgrad der Meldung.
- **Einfachheit der Bedienung:** Einfache und unkomplizierte Umsetzung wird vorausgesetzt.
- **Ergebnissichtbarkeit:** Die Auswertung des Fahrverhaltens interessiert nur sekundär.

Aus den Ergebnissen der Fokusgruppe lassen sich für die Auslegung des Virtuellen Fahrtrainers folgende Anforderungen ableiten:

1. Eine korrekte Umsetzung der Fahrhinweise muss einen signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben und dem Fahrer die Sicherheit geben, eine gute Bewertung bei seinem Arbeitgeber zu erzielen.
2. Die Fahrhinweise müssen zeitgerecht zur richtigen Situation ausgegeben werden.
3. Der Meldungsinhalt muss eine präzise Umsetzung zulassen.
4. Der Fahrtrainer muss einfach zu bedienen sein.

Für die Erfüllung der ersten beiden Anforderungen ist in erster Linie die richtige Funktionalität der Fahrfehlererkennung verantwortlich. Die beiden letzten Anforderungen betreffen die Mensch-Maschine-Schnittstelle und werden im Folgenden näher ausgeführt.

III.4.2 Abstraktionsniveau der Fahrhinweise

Bei der Anforderungsermittlung wurde insbesondere die Präzision der Systemmeldungen als entscheidender Motivator identifiziert. Für die Gestaltung der Fahrerschnittstelle ergibt sich daraus die Fragestellung, welches Abstraktionsniveau sich für Anwendung des Virtuellen Fahrtrainers hinsichtlich Umsetzungsgenauigkeit besonders eignet.

Prinzipiell lassen sich zwei Arten von Fahrhinweisen darstellen:

- **Bedienebene:** Der Fahrhinweis teilt dem Fahrer mit, welche Bedienelemente er betätigen muss, um kraftstoffeffizient zu fahren. Durch diese sehr präzisen Anweisungen auf Bedienebene muss der Fahrer den Fahrhinweis nicht weiter interpretieren, doch dies setzt auch systemseitig ein sehr detailliertes Situationswissen voraus.
- **Manöverebene:** Fahrhinweise werden auf einer höheren Abstraktionsebene übermittelt und dem Fahrer wird ein Manöver vorgeschlagen, das sich aus mehreren Bedienschritten zusammensetzen kann. Dem Fahrer fällt die Aufgabe zu, die notwendigen Handlungsschritte aus dem Manövervorschlag abzuleiten und umzusetzen. Es ist zu erwarten, dass dieser Denkprozess die Ausführung verzögert oder auch zu fehlerhaften Bedienschritten führen kann. Jedoch lässt sich vermuten, dass ein größerer

Lerneffekt erzielt werden kann, da eine intensivere Auseinandersetzung mit dem situativen Geschehen gefördert wird.

Abbildung 21 zeigt diesen Unterschied im Abstraktionsniveau am Beispiel einer Folgesituation. Im Allgemeinen ist es wirtschaftlich, einen größeren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug aufzubauen. Dadurch ergeben sich zusätzliche Handlungsspielräume, um auf Geschwindigkeitsänderungen des Vorderfahrzeugs wirtschaftlich zu reagieren. Um einen größeren Abstand zum Vorderfahrzeug aufzubauen, sollte der Fahrer möglichst während Geschwindigkeitsspitzen des Vorderfahrzeugs mit einer niedrigeren, konstanten Geschwindigkeit folgen. Ein Fahrhinweis auf Bedienebene gibt in diesem Fall konkret an, den Tempomat auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu setzen. Auf Manöverebene bekommt der Fahrer die Aufgabe gestellt, den Abstand zu vergrößern. Die Umsetzung dieses Manövers bleibt dem Fahrer überlassen und kann je nach Situation unterschiedlich ausfallen.



Abbildung 21: Exemplarischer Fahrhinweis auf Bedienebene (links) und auf Manöverebene (rechts)



Abbildung 22: Ein Proband am Prüfstand der MAN Truck & Bus AG [Kor12, S. 63]

Zur Klärung dieser Fragestellung wird am HMI-Prüfstand der MAN Truck & Bus AG ein Probandenversuch mit 27 Teilnehmern durchgeführt. In diesem Versuch wird überprüft, welches

Abstraktionsniveau sich für die Anwendung des Virtuellen Fahrtrainers hinsichtlich Umsetzungsgenauigkeit und langfristigem Lernerfolg besser eignet [Kor12, S. 61].

Um unterschiedliche Bewertung durch unterschiedliche optische Gestaltung auszuschließen, werden die Systemmeldungen nur textuell dargestellt (Abbildung 21:Abbildung 21). Die Probanden durchfahren jeweils zweimal eine identische Versuchsstrecke mit acht für den Virtuellen Fahrtrainer relevanten Situationen. Sie werden jeweils entweder mit präzisen oder unpräzisen Fahrhinweisen konfrontiert.

Die zentrale Fragestellung der Meldungspräzision wird in zwei Hypothesen operationalisiert [Kor12, S.72f]:

- H1: Je präziser die Systemmeldungen, desto höher die wahrgenommene Nützlichkeit des Systems.
- H2: Je präziser die Systemmeldungen, desto höher die Kraftstoffeffizienz.

Die wahrgenommene Nützlichkeit wird mittels einer der TAM2-Skala erfasst [Ven00]. Für die Bestimmung der Kraftstoffeffizienz wird auf die Verbrauchsdaten des Prüfstands zurückgegriffen und für die jeweiligen Situationen der situative Verbrauch bestimmt.

Durch den Versuch kann die Hypothese H1 nicht bestätigt werden. Aus Fahrersicht unterscheidet sich die Meldungspräzision hinsichtlich wahrgenommener Nützlichkeit nicht. Hypothese H2 wird hingegen H2 bestätigt. Durch eine präzise Handlungsanweisung gelingt es den Fahrern einen niedrigeren situativen Verbrauch zu erzielen. Insbesondere die Handlungsanweisung, dem Vorderfahrzeug in größerem Abstand zu folgen, kann von den Fahrern nicht vollständig im gewünschten Maß umgesetzt werden. Erst durch die konkrete Geschwindigkeitsvorgabe gelingt es den gewünschten kraftstoffsparenden Effekt zu erzielen.

Für die Systementwicklung leitet sich daraus ab, dass die Meldungen einen möglichst hohen Präzisionsgrad aufweisen müssen und den Fahrer zu konkreten Bedienhandlungen auffordern sollten. Dies stellt jedoch auch erhöhte Anforderungen an die Situations- und Fahrfehlererkennung, die diese präzisen Informationen in hoher Robustheit zur Verfügung stellen muss.

III.4.3 Meldungsinhalte

Aus systemergonomischer Sicht ist für den Lernerfolg entscheidend, die durchzuführende Handlung sowie die zugrundeliegende Begründung für die Handlung zu übermitteln [Moh13, S. 105]. In der automobilen Anwendung muss darüber hinaus eine schnelle Erfassbarkeit der Informationen sichergestellt werden [Man00, S.9]. Deshalb wird eine großflächige Darstellung der Informationen angestrebt. Der Handlungshinweis und die dazugehörige Begründung werden jeweils mit intuitiv erfassbaren Symbolen visualisiert.

Für die bereits im Projekt identifizierten, relevanten Fahrsituationen werden jeweils ein passender Handlungshinweis (Aktion) und die dazugehörige Begründung erarbeitet (Grund). Aktion und Grund werden mit entsprechenden Piktogrammen veranschaulicht. Im Vordergrund steht dabei die schnell während der Fahrt erfassbare Handlungsanweisung.



Abbildung 23: Anzeige des Fahrhinweises und der Begründung [Hey13].

Im Rahmen der Vorbereitungen zur Fahrsimulatoruntersuchung (Unterkapitel III.5) wird ersichtlich, dass für eine nutzergerechte Mensch-Maschine-Schnittstelle weitere Systeminformationen in Form von Feedback zielführend sind.

Nach ZÜHLKE werden für technische Systeme mit MMS insgesamt drei Arten von Feedback unterschieden [Züh12, S. 26]:

- Das **Handlungsfeedback** gibt dem Nutzer unmittelbar zu erkennen, dass dieser die Handlung in gewünschter Form ausgeführt hat.
- Das **Statusfeedback** meldet dem Nutzer den Stand des Fortschritts in der Zielerreichung. Laut ZÜHLKE ist ein derartiges Feedback insbesondere dann angebracht, wenn bis zur Zielerreichung mehr als 2 s vergehen.
- Das **Zielfeedback** teilt dem Nutzer mit, dass die Handlung vollständig ausgeführt und das Ziel erreicht wurde.

Während der Funktionstests des Virtuellen Fahrtrainers und der Abstimmung der Szenarien im Fahrsimulator führt vor allem das fehlende Statusfeedback bei vorausschauenden Fahrhinweisen zu Irritationen. Da sich diese prädiktiven Anweisungen in der Versuchsstrecke teilweise auf weit vorausliegende Straßenmerkmale beziehen (z. B. Kurve, Tempolimit), ist für einen Fahrer ohne entsprechendes Feedback nicht ersichtlich, auf welches Merkmal sich die Anweisung bezieht („Die nächste Kurve? Die übernächste Kurve? Oder eine ganz andere Kurve?"). Daher wird in das Anzeigekonzept ein Statusfeedback in Form einer Entfernungsangabe aufgenommen (Abbildung 24). Dadurch soll gewährleistet werden, dass der Fahrer genau nachvollziehen kann, wie lange er die Handlungsanweisung umsetzen sollte.

Während des Fahrsimulatorversuchs ist dieses Statusfeedback räumlich dem Piktogramm der Aktion zugeordnet (Abbildung 23). Die Auswertung der Befragungen zum Versuch führen zu der Erkenntnis, dass eine Zuordnung zum Grund verständlicher ist. Daher wird im finalen MMS-Design für vorausschauende Fahrhinweise die die Entfernungsangabe unter dem Grund dargestellt (Abbildung 23).



Abbildung 24: Visuelle Anweisung des Virtuellen Fahrtrainers mit Statusfeedback während des Fahrsimulatoversuchs

III.4.4 Integration ins Fahrzeug

Für die Darstellung der Fahrhinweise wird ein Tertiärdisplay verwendet, das auch für andere Anwendungen als Zusatzoption für die Kunden der MAN Truck & Bus AG erhältlich ist. Das Anzeigeelement ist im Sichtbereich des Fahrers positioniert und kann durch das Touchdisplay einfach bedient werden (Abbildung 25). Ist der Fahrtrainer einmal ausgewählt, sind während der Fahrt keine zusätzlichen Bedieneingriffe notwendig.



Abbildung 25: Integration des Anzeigeelements in den Demonstrator

III.4.5 Filter- und Priorisierungsstrategie

Ohne Filterung und Priorisierung der Meldungen würde der Virtuelle Fahrtrainer jeden detektierten Fahrfehler unmittelbar ausgeben und an die Mensch-Maschine-Schnittstelle übermitteln. Verursacht der Fahrer viele Fehler in einem kurzen Zeitraum, wird er mit einer Vielzahl von Meldungen und Anweisungen konfrontiert. Dies ist sowohl aus Akzeptanzgründen als auch aus Gründen der kognitiven Informationsverarbeitung durch den Fahrer unvorteilhaft. Daher wird für den Virtuellen Fahrtrainer ein Filter- und Priorisierungsstrategie entwickelt, die für eine geregelte Ausgabe von Anweisungen sorgt [Bau13].

Die Konzeption der Filter- und Priorisierungsstrategie kann im Hinblick auf verschiedene Auslegungsschwerpunkte erfolgen. Beim Virtuellen Fahrtrainer bieten sich vor allem zwei Auslegungsschwerpunkte an:

1. Nutzerakzeptanz und
2. Lernwirksamkeit.

Das Erreichen eines hohen Akzeptanzniveaus stellt bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen im Allgemeinen und bei der des Virtuellen Fahrtrainers im Besonderen einen notwendigen Auslegungsschwerpunkt dar. Nur wenn das System bei den Fahrern auf eine hohe Akzeptanz stößt, setzen diese es ein und führen die Anweisungen des Systems aus. Neben anderen Einflussfaktoren (z. B. Design, Bedienfreundlichkeit) ist davon auszugehen, dass beim Virtuellen Fahrtrainer die Anzahl und Dauer von Meldungen einen starken Einfluss auf die Nutzerakzeptanz haben. Die Meldungsanzahl und -dauer kann mithilfe eines Filter- und Priorisierungsmoduls gesteuert werden.

Der Auslegungsschwerpunkt Lernwirksamkeit beschreibt für Fahrerassistenzsysteme im Allgemeinen keine Notwendigkeit[2]. Da ein Hauptaugenmerk des Virtuellen Fahrtrainers auf der Vermittlung einer wirtschaftlichen Fahrweise liegt, erscheint eine Auslegung der Filter- und Priorisierungsstrategie unter Berücksichtigung der Lernwirkung durchaus sinnvoll. Im Rahmen des Projektes sind jedoch keine Langzeitstudien vorgesehen. Daher erfolgt eine Auslegung und Optimierung des Virtuellen Fahrtrainers nur auf Aspekte der kurzfristigen Lernwirksamkeit. Dazu wird das Konzept der Cognitive Load Theory (CLT; deutsch Kognitive Beanspruchungstheorie) herangezogen [Swe88]. Die CLT geht davon aus, dass Lernprozesse besonders wirksamer sind wenn die kognitive Beanspruchung beim Lernen niedrig gehalten wird. Wie bei der akzeptanzorientierten Konzeption der Filter- und Priorisierungsstrategie, sind damit für die Lernwirksamkeit ebenfalls die Meldungsanzahl und -dauer wichtige Auslegungsparameter.

III.4.5.1 Kategorisierung der Fahrfehler in Hinblick auf die Filter- und Priorisierungsstrategie

Um die Komplexität der Filterung zu minimieren und dadurch eine effektive Algorithmenentwicklung zu ermöglichen, werden die vom Virtuellen Fahrtrainer detektierbaren Fahrfehler zunächst klassifiziert [Bau13]. Die Klassifikation ermöglicht zum einen Gruppen von Fahrfehlern zu identifizieren, die nicht gleichzeitig auftreten können, und zum anderen für die verschiedenen Gruppen einheitliche Algorithmen zu entwerfen. Die Einteilung der Fahrfehler erfolgt anhand der Kategorien „Bewegungszustand des Fahrzeugs“, „Auswirkungen der Fehler“, „Ursache der Fehlerentstehung“ sowie „Zeitliche Fehlerentstehung“ (Abbildung 26).

Da Fehler, die einen Stillstand voraussetzen, nie gleichzeitig mit Fehlern auftreten, die während der Fahrt entstehen, erfolgt eine erste Kategorisierung anhand des Bewegungszustands des Fahrzeugs. Eine Unterteilung der Fahrfehler in der Dimension „Auswirkung“ ist zweckmäßig, um zu entscheiden, wie wichtig eine unmittelbare Ausgabe der zugehörigen

---

[2] Lernwirksamkeit beschreibt in diesem Zusammenhang nicht die Einfachheit die Benutzung eines Systems zu erlernen, sondern wie wirksam das System Wissen vermittelt und die Fertigkeiten des Nutzers erweitert.

Anweisung an den Fahrer ist. Strategische Fehler sind dadurch gekennzeichnet, dass ein konstante Fahrweise suboptimal umgesetzt wird (z. B. zu hohe Reisegeschwindigkeit). Die Fehler sind also auf eine unzureichende Strategie des Fahrers in der entsprechenden Situation zurückzuführen. Dadurch liegen diese Fehler häufig über einen längeren Zeitraum vor. Aufgrund des langen Wirkens bergen sie zwar ein hohes Einsparpotential, allerdings ist aus diesem Grund auch kein unmittelbares Abstellen des Fehlers erforderlich. Eine zugehörige Anweisung kann durch den Virtuellen Fahrtrainer also durchaus im Sekunden- oder sogar Minutenbereich verzögert werden.

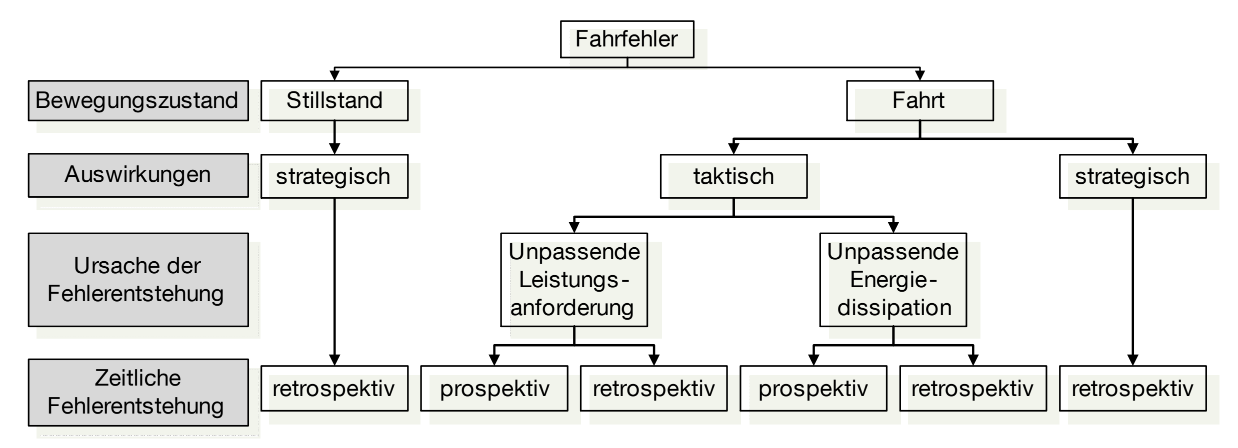


Abbildung 26: Kategorisierung der Fahrfehler in Hinblick auf die Entwicklung eines Filterungs- und Priorisierungskonzeptes [Bau13]

Taktische Fehler beschreiben hingegen ein unpassendes Verhalten in zeitlich beschränkten Situationen, in denen der energetische Zustand des Fahrzeugs wechselt (z. B. Veränderung der kinetischen Energie aufgrund einer Veränderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit oder Veränderungen der potentiellen Energie aufgrund der Topografie). Die Fehlerentstehung lässt sich daher weiter in unpassende Leistungsanforderungen (z. B. Leistungsanforderungen vor Gefällen) und unpassende Energiedissipation (z. B. Verzögern vor Steigungen) unterteilen. Da die Ausgabe taktischer Fehler nur sinnvoll ist, wenn sie erfolgen kann, bevor der energetische Zustandswechsel vollzogen wurde, weisen diese Fehler eine höhere Zeitkritikalität auf als strategische Fehler.

Schließlich lassen sich die Fehler nach der zeitlichen Fehlerentstehung in den Ausprägungen „prospektiv“ und „retrospektiv“ klassifizieren. Dieses Unterscheidungskriterium ist in erster Linie den Möglichkeiten zur prädiktiven Fehlererkennung zuzuschreiben. Für prospektive Fehler kann der Algorithmus den idealen Handlungszeitpunkt bereits bestimmen, bevor dieser erreicht wird. Liegt zum idealen Handlungszeitpunkt keine korrekte Fahrweise vor (z. B. vor einem Gefälle weiterhin Leistungsanforderung), kann die Anweisung direkt ausgegeben werden („Bitte jetzt Fuß vom Gas!“). Derartige Algorithmen zur prospektiven Bestimmung der idealen Fahrweise können prinzipiell auch für eine automatisierte Längsführung verwendet werden.

Anders verhält es sich mit den Algorithmen, die retrospektiv die Fehlerentstehung erkennen. Retrospektive Fehler können durch die Fehlererkennung erst im Nachhinein erkannt werden. Dies liegt daran, dass solche Fehler im Zusammenhang mit dem Fahrerwunsch hinsichtlich der Längsdynamik stehen. Entweder spiegelt der Fahrerwunsch direkt eine suboptimale Fahrweise wieder. Dies ist der Fall bei strategischen Fehlern, etwa dem Wunsch des Fahrers nach einer unnötig hohen Reisegeschwindigkeit. Oder aber der energetische Zustand wird



aufgrund einer Veränderung des Fahrerwunsches suboptimal angepasst, z. B. wenn der Fahrer die Geschwindigkeit von 55 km/h auf 60 km/h erhöhen möchte und dies durch die Betätigung des Kickdowns umsetzt. Da die Fehlererkennung den Fahrerwunsch nicht kennt, müssen Annahmen getroffen werden, ob von einem „vorsätzlichen“ Fahrfehler auszugehen ist. Beabsichtigt der Fahrer längerfristig eine unnötig hohe Reisegeschwindigkeit einzuhalten oder ist er aufgrund des Beschleunigungsvorgangs nur kurzfristig unverhältnismäßig schnell gefahren? Wurde der Kickdown durch zu feste Betätigung des Fahrpedals irrtümlich ausgelöst oder möchte der Fahrer eine unpassende Beschleunigung durchführen? Derartige Fragen lassen sich mithilfe der Fehlererkennung nur beantworten, indem das Fahrerverhalten über einen begrenzten Zeitraum beobachtet wird. Ist das Fehlverhalten innerhalb dieses Zeitraums handlungsbestimmend, kann mit hinreichender Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass die vom Fahrer gewählte Strategie oder Taktik unzweckmäßig ist. Das Verhalten des Fahrers wird somit retrospektiv als Fehler erkannt.

III.4.5.2 Funktionsentwicklung des Filterungs- und Priorisierungsmoduls

Um mithilfe eines Filterungs- und Priorisierungsmoduls zu einer hohen Akzeptanz beizutragen, wird zunächst analysiert, welche Meldungsaspekte des Virtuellen Fahrtrainers in der Modellvorstellung des Technologieakzeptanzmodells nach DAVIS (engl.: Technology Acceptance Model, TAM) eine Beeinflussung der Systemnutzung erwarten lassen [Dav86]. Demnach wird vermutet, dass die Aspekte „Quantität bzw. Häufigkeit der Meldungen“, „Zeitpunkt der Meldungsausgabe“, „Anzeigedauer der Meldungen“, „Ausgabepriorisierung“ und „Individualisierung“ direkt den „Wahrgenommenen Nutzen“ (engl. Perceived Usefulness) und die „Wahrgenommene Einfachheit der Nutzung“ (engl. Perceived Ease of Use) beeinflussen. Wie in Abbildung 27 dargestellt, ist von dem „Wahrgenommenen Nutzen“ und der „Wahrgenommenen Einfachheit der Nutzung“ wiederum die „Verhaltensintention“ abhängig, woraus das „Akzeptanzverhalten“ und schließlich die tatsächliche Nutzung des Systems resultiert [Ven96].

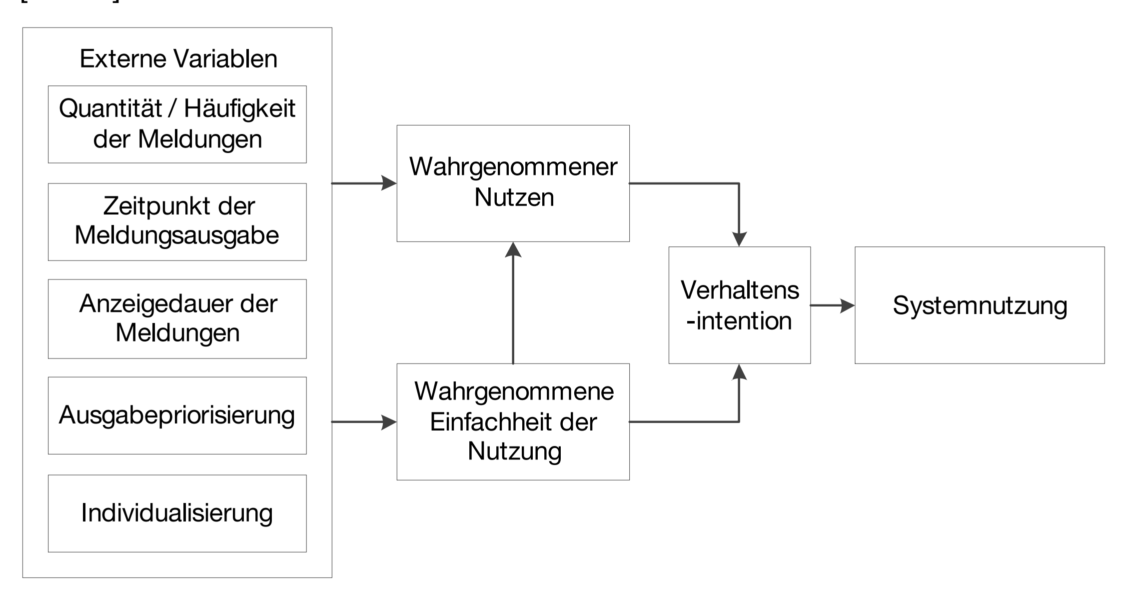


Abbildung 27: Meldungsaspekte des Virtuellen Fahrtrainers als externe Variablen des Technologieakzeptanzmodells ([Bau13] nach [Ven96])

Anhand der ermittelten Meldungsaspekte bzw. externen Variablen werden schließlich Funktionen entwickelt und implementiert, die auf eine Maximierung des „Wahrgenommen Nutzens“ und der „Wahrgenommenen Einfachheit der Nutzung“ abzielen [Bau13].

Grundfunktionalität

Ein Meldungsfilter ist immer dann angebracht, wenn mehrere Meldungen gleichzeitig auftreten können und eine daraus resultierende Überforderung des Nutzers wahrscheinlich ist. Das MMS-Konzept des Virtuellen Fahrtrainers sieht keine gleichzeitige Anzeige mehrerer Anweisungen vor. Daher stellt das Filter- und Priorisierungsmodul sicher, dass die Ausgabe von nur einer Meldung erfolgt und diese Meldung unterbrechungsfrei hinreichend lange angezeigt wird. Nur so kann der Fahrer die Informationen verarbeiten, ohne mental zu stark beansprucht zu werden. Die Grundfunktionalität deckt Meldungsaspekte der „Quantität/Häufigkeit“ sowie der „Anzeigedauer“ ab.

Fehlerspeicherung

Wenn auf dem Anzeigegerät aktiv eine Anweisung vorliegt und der Fahrer aufgrund seiner Fahrweise weitere positive Fahrfehlerdetektionen erzeugt, werden diese Fehlerdetektionen gespeichert. Gerade für retrospektive taktische Fehler erscheint eine verspätete Ausgabe innerhalb zeitlicher Grenzen sinnvoll, auch wenn der Fehler zum Zeitpunkt der verspäteten Ausgabe nicht mehr aktiv ist. Die Funktion der Fehlerspeicherung erfüllt Anforderungen der „Quantität/Häufigkeit“, des „Zeitpunktes der Meldungsausgabe“ und der „Anzeigedauer“.

Priorisierung der Ausgabe von gleichzeitig vorliegenden Fehlern

Werden zwei Fahrfehler gleichzeitig ausgelöst, wird der höher priorisierte Fehler zuerst ausgegeben. Die Priorisierung erfolgt anhand einer statischen und einer dynamischen Komponente. Die statische Komponente der Priorisierung orientiert sich an der Fehlerrelevanz, die in der Expertenbefragung ermittelt wurde (III.1). Zudem wird ein Faktor verwendet, der die Zeitkritikalität berücksichtigt. So ist die Anzeige strategischer Fehler als weniger kritisch einzustufen als die der retrospektiven taktischen Fehler. Am kritischsten hinsichtlich einer zeitnahen Ausgabe sind prospektive taktische Fehler, die entsprechend mit dem höchsten Faktor belegt sind. Während die statische Komponente konstant bleibt, ändert sich die dynamische Komponente der Priorisierung in Abhängigkeit davon, ob der Fehler aktiv ist oder nicht aktiv im Fehlerspeicher vorliegt. Da nicht mehr aktive, gespeicherte Fehler schnellstmöglich ausgegeben werden sollen, erhalten diese eine hohe dynamische Relevanz. Somit wird sichergestellt, dass diese vom Virtuellen Fahrtrainer trotzdem zeitnah adressiert werden. Die beschriebene Funktion adressiert sowohl die „Ausgabepriorisierung“ als auch indirekt die „Quantität/Häufigkeit“ sowie des „Zeitpunktes der Meldungsausgabe“.

Zeitliche Dauer der visuellen Anzeige von Fehlern

Grundsätzlich werden Anweisungen zu Fahrfehlern zehn Sekunden auf dem Display des Virtuellen Fahrtrainers angezeigt. Um dem Fahrer bei prospektiven und strategischen Fehlern eine Form des Zielfeedbacks zu ermöglichen (vgl. Abschnitt III.4.3), wird bei diesen eine andere Art der Darstellung gewählt.

Bei prospektiven Fehlern ist eine Speicherung und Ausgabe der Anweisung nur bedingt sinnvoll, wenn das Objekt, auf das sich die Anweisung bezieht, passiert wurde (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzung). Daher werden derartige Fehler vom Virtuellen Fahrtrainer nicht retrospektiv angezeigt. Stattdessen erfolgt eine Anzeige der Anweisung solange, bis das

Objekt passiert wird. Durch das Ausblenden der Anweisung beim Erreichen des Zielobjekts wird also ein Zielfeedback umgesetzt.

Ein ähnliches Zielfeedback ist auch bei der Ausgabe von strategischen Fehlern zweckmäßig. Wird die Anweisung zu einem strategischen Fehler vom Fahrer nicht wahrgenommen oder bewusst ignoriert, so ist eine langfristig gesehen suboptimale Fahrweise sehr wahrscheinlich. Um dem Fahrer ein späteres Handeln zu ermöglichen, werden Anweisungen zu strategischen Fehlern so lange vom Virtuellen Fahrtrainer angezeigt, bis der Fehler abgestellt wurde. Unterbrechungen durch andere akute Fehler sind währenddessen möglich. Das Ausblenden eines strategischen Fehlers ist also ebenfalls ein Zielfeedback, das die richtige Umsetzung durch den Fahrer abbildet. Die Funktion der zeitlichen Begrenzung einer Ausgabe ist ein Bestandteil des Meldungsaspekts „Anzeigedauer“.

Wiederholung der akustischen Ausgabe bei strategischen Fehlern

Eine weitere Funktion zur Verringerung langfristiger Folgen durch einen strategischen Fehler stellt die Wiederholung der akustischen Ausgabe dar. Generell erfolgt die Fehlerausgabe sowohl akustisch mittels Sprachausgabe (z. B. „Bitte jetzt Fuß vom Gas!“) als auch visuell (Abbildung 23), wobei die visuelle Anweisung bis zum Abstellen des strategischen Fehlers auf dem Display angezeigt wird. Um der visuellen Anweisung mehr Gewicht zu verleihen, ist eine Wiederholung der akustischen Meldung durch den Virtuellen Fahrtrainer vorgesehen. Der Zeitabstand zwischen den Wiederholungen wird dabei kontinuierlich erhöht, um die Akzeptanz durch den Fahrer nicht unnötig zu strapazieren. Mit der Wiederholung der akustischen Ausgabe bei strategischen Fehlern werden die externen Variablen „Quantität/ Häufigkeit“, „Zeitpunkt der Meldungsausgabe“ und „Individualisierung“ hinsichtlich der Akzeptanz beeinflusst.

Filterung der Ausgabe von wiederholt auftretenden Fehlern

Um zu verhindern, dass die Systemakzeptanz durch eine zu häufige Ausgabe des gleichen Fehlers reduziert wird, blockiert das Filter- und Priorisierungsmodul die Ausgabe des gleichen, wiederholt auftretenden Fehlers innerhalb einer festgelegten Zeitspanne. Mehrt sich die Wiederholung, wird analog zur Wiederholung der akustischen Ausgabe bei strategischen Fehlern, die Zeitspanne der Blockierung von Wiederholung zu Wiederholung erhöht. Das Prinzip dieser Funktion ist in Abbildung 28 dargestellt. Die Funktion der Filterung von wiederholt auftretenden Fehlern erfüllt Anforderungen an die „Quantität/Häufigkeit“, den „Zeitpunkt der Meldungsausgabe“ und die „Individualisierung“.

Erkennung von Verweigerungen

Wird ein Fehler wiederholt bzw. die wiederholte Ausgabe eines Fehlers vom Fahrer ignoriert, so ist davon auszugehen, dass der Fahrer der Anweisung des Virtuellen Fahrtrainers zu diesem Fahrfehler nicht Folge leisten möchte. Ggf. ist der Fahrer trotzdem bereit, andere Anweisungen des Systems umzusetzen. Daher verfügt das Filter- und Priorisierungsmodul über eine Funktion, mit der Verweigerungen erkannt werden. Bei retrospektiven taktischen Fehlern wird das erneute Auftreten dieses Fehlers nach der ersten Anweisung als „Ignoriert“ gewertet. Prospektive und strategische Fehler werden dann als „Ignoriert“ erachtet, wenn sie nach dem Ablauf einer festgelegten Zeitspanne nach der Ausgabe noch immer aktiv sind. Das wiederholte Ignorieren einer Anweisung führt zu der Annahme, dass die Umsetzung der Anweisung vom Fahrer verweigert wird. Daher wird der Fehler für die aktuelle Fahrt vom System nicht mehr beachtet und es werden keine entsprechenden Anweisungen mehr aus-

gegeben. Die Erkennung von Verweigerungen trägt mit der Berücksichtigung der fahrerspezifischen Umsetzungsbereitschaft zur „Individualisierung“ des Systems bei.

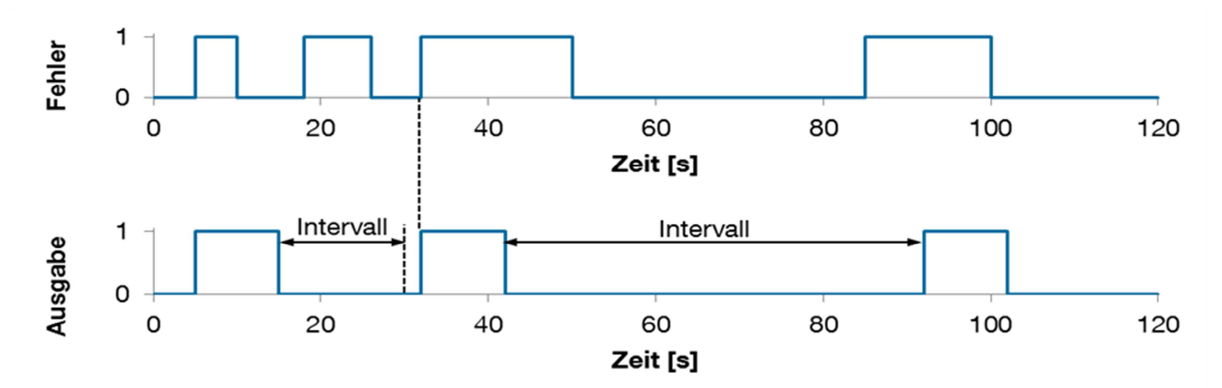


Abbildung 28: Auftreten eines Fehlers und gefilterte Ausgabe mit größer werdenden Zeitintervallen zur Blockierung der Ausgabe [Bau13]

Da der Virtuelle Fahrtrainer ein System ist, dass eine starke Interaktion zwischen System und Fahrer vorsieht, kommt der Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle eine Schlüsselrolle zu. Am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik ist im Berichtszeitraum zum einen ein neuartiges Motivationskonzept erarbeitet wurden und zum anderen wurde mit den Arbeiten zur Entwicklung der Filter- und Priorisierungsstrategie begonnen.

III.4.6 Gamification-Konzept zur Erhöhung der Nutzungsmotivation

Das Konzept des Virtuellen Fahrtrainers sieht ein Verbrauchsassistenzsystem vor, das einem Fahrlehrer oder Instruktor gleich, umgehend situativ Anweisungen an den Fahrer übermittelt. Diese Anweisungen erfolgen in Form einer konkreten Handlungsanweisung in Verbindung mit einer Begründung (Abschnitt III.4.3). Vor der Einfahrt in ein Gefälle kann diese z. B. lauten: „Bitte jetzt Fuß vom Gas!“ (Handlungsanweisung) „Schwung ausnutzen.“ (Begründung). Die Wirksamkeit des Virtuellen Fahrtrainers hängt entscheidend von der Bereitschaft des Fahrers ab, diese Handlungsanweisungen zu akzeptieren, um sie dann umzusetzen. Dem Fahrer wird dabei vom System Verantwortung entzogen, sodass ihm in ersterer Linie eine passive Rolle zukommt. Er nimmt eine Anweisung entgegen und kann diese, wenn er sie akzeptiert, grundsätzlich unreflektiert umsetzen. Dem Fahrer wird vom System wenig Handlungsspielraum gelassen („setzen Sie die Tätigkeit JETZT um“), sodass der Erfolg der Handlung bei Umsetzung durch den Fahrer ausschließlich vom System abhängt. Vor dem Hintergrund dieser Passivität ist fraglich, inwieweit der Fahrer motiviert ist, das System dauerhaft einzusetzen (vgl. hierzu das Konzept der Selbstwirksamkeitserwartung [Ban77]).

Um Personen (z. B. Kunden, Nutzer, Mitarbeiter) aus ihrer passiven Rolle zu lösen und stärker zu aktivieren, hat sich in anderen Bereichen (z. B. Marketing, Internet, Bildung) ein Konzept etabliert, das sich Gamification oder Gamifizierung nennt. Nach BREUER ist Gamification *„die Verwendung von spieltypischen Mechaniken außerhalb reiner Spiele, mit dem Ziel, das Verhalten von Menschen zu beeinflussen“* [Bre11]. Spieltypische Mechaniken sind u. a. Punkte, Auszeichnungen, Ranglisten aber auch Rätsel und herausfordernde Aufgaben (sog. Quests).

Im Bereich des wirtschaftlichen Fahrens sind ebenfalls erste Gamification-Konzepte in Serie eingeführt worden [SPI12]. Diese machen sich Spielemechanismen wie Ranglisten, Punkte, Auszeichnungen und Fortschrittsanzeigen zur Beeinflussung der Fahrweise zunutze, häufig unterstützt durch spielerische Darstellungen (Bälle, Pflanzen etc., vgl. Abbildung 29:). Jedoch ist kein Gamification-Konzept aus der Fahrzeugtechnik bekannt, das die Fahrer mit konkreten, situativen und herausfordernden Aufgaben konfrontiert. Dabei zeigen nicht nur andere Bereiche der Gamification, sondern vor allem auch die Motivationspsychologie, dass Herausforderung förderlich sein kann, um Menschen für eine Tätigkeit zu motivieren (sog. leistungsthematische Tätigkeitsanreiz) [Rhe10], [Abu12].

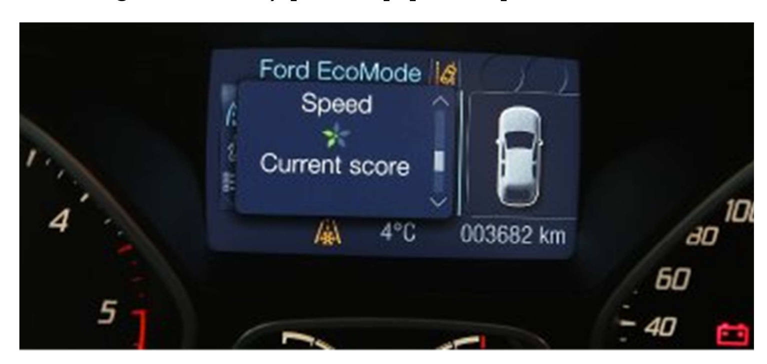


Abbildung 29: Belohnungssystem des Gamification-Konzepts von Ford mit Hilfe einer Pflanzendarstellung [SPI12]

Das Gamification-Konzept, das am FTM entwickelt wurde, sieht daher eine konsequente Gamification vor [Dau12a]. Der Fahrer soll dabei situativ mit Aufgaben konfrontiert werden, deren Umsetzung dann zu einer wirtschaftlicheren Fahrweise führt. Im Gegensatz zur Standardausführung des Virtuellen Fahrtrainers sieht dieses Konzept vor, dass der Fahrer vom System keine konkreten Handlungsanweisungen, sondern vielmehr Handlungsziele vorgegeben bekommt. Dies soll am Beispiel der Einfahrt in ein Gefälle erläutert werden.

Nähert der Fahrer sich einem Gefälle, vor dem er aus Gründen einer topografieangepassten Fahrweise den „Schwung“ ausnutzen und die Geschwindigkeit reduzieren sollte, so wird der Fahrer nun mit einer herausfordernden Aufgabe konfrontiert. Das System gibt etwa vor: „Nehmen Sie zum richtigen Zeitpunkt den Fuß vom Gas, sodass Sie mit genau 78 km/h ins Gefälle rollen!“ Vorstellbar ist, dass der Fahrer nun vom System Hilfestellungen erhält, diese Aufgabe bestmöglich zu absolvieren. So kann ein Zeitfenster vorgegeben werden, in dem der ideale Zeitpunkt zur Fußwegnahme liegt. Das genaue Treffen dieses Zeitpunktes wird jedoch in den Verantwortungsbereich des Fahrers gelegt. Außerdem können Informationen wie Entfernung und die mittlere Steigung bis zum Gefällebeginn angezeigt werden.

Neben dem Umstand, dass ein derartiges Konzept eine aktivere Einbindung des Fahrers vorsieht, um ihn stärker zu motivieren, weist es einen weiteren Vorteil auf. Es ist davon auszugehen, dass viele Fahrer auf das Image eines sparsamen, umweltbewussten Fahrers keinen besonderen Wert legen. Das vorgestellte Gamification-Konzept ermöglicht es, den eigentlichen Grund der Aufgaben, das wirtschaftliche Fahren, in den Hintergrund zu rücken. Bei oben aufgeführtem Beispiel zur Erreichung einer Zielgeschwindigkeit durch einen Rollvorgang kann ohne weiteres argumentiert werden: „Kennen und beherrschen Sie Ihr Fahrzeug so gut, dass sie die Zielgeschwindigkeit durch einen Rollvorgang treffen können?“ Entsprechend würde eine Bewertung der Aufgabenerfüllung sowohl Abzüge bei einer zu schnel-

len als auch bei einer zu langsamen Zielgeschwindigkeit nach sich ziehen. Aus rein wirtschaftlichen Gründen wäre eine zu langsame Zielgeschwindigkeit sogar vorteilhaft.

Das dargestellte Gamification-Konzept stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Beeinflussung der Fahrweise dar und eröffnet ein neuartiges Forschungsfeld für den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen. Daher wurde hierzu eine Patentanmeldung eingeleitet [Dau12b]. Eine Konkretisierung und Implementierung dieses Konzeptes neben dem anweisungsbasierten MMS-Konzept ist mit den im Projekt „Virtueller Fahrtrainer" vorgesehenen Ressourcen nicht realisierbar. Eine Implementierung des Konzeptes wurde deshalb im Rahmen des Virtuellen Fahrtrainers nicht vorgenommen.

III.5 AP5 Akzeptanzprüfung Mensch-Maschine-Schnittstelle

Das Konzept des Virtuellen Fahrtrainers sieht ein Fahrerassistenzsystem vor, dass dem Fahrer situativ Handlungshinweise gibt. Diese weisen darauf hin, wie der Fahrzeugführer seine Fahrweise hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches und des Verschleißes verbessern kann. Dieses Konzept sieht keine Eingriffe durch das System vor (z. B. Bremseingriffe, automatisierte Längsführung). Der Virtuelle Fahrtrainer kann also nur dann zu einer Verbrauchs- und Verschleißreduktion beitragen, wenn die Fahrhinweise durch den Fahrer umgesetzte werden. Von zentraler Bedeutung ist daher die Entwicklung einer funktionierenden Mensch-Maschine-Schnittstelle (MSS) (Unterkapitel III.4) und deren Akzeptanz durch den Fahrer.

Um das Konzept des Virtuellen Fahrtrainers im Allgemeinen und die Funktionsfähigkeit der MSS zu evaluieren, wird ein Fahrsimulatorversuch durch den Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München durchgeführt [Dau13]. Dieser soll Aufschluss darüber liefern, ob das System zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs führen kann.

Der Fahrsimulatorversuch soll sowohl einen Nachweis der Wirksamkeit mithilfe von objektiven Messgrößen (Kraftstoffverbrauch) als auch der Nutzerakzeptanz mittels Befragungen. Nachfolgend wird das Versuchskonzept, die Durchführung am Fahrsimulator sowie die Ergebnisse der objektiven Betrachtung dargestellt. Im abschließenden Realversuch werden zum großen Teil die gleichen bzw. ähnliche Befragungen verwendet (Unterkapitel III.9). Aus diesem Grund werden die Resultate der Akzeptanzbefragung des Fahrsimulatorversuchs in Abschnitt III.9.5 dargestellt und den Befragungsergebnissen des Realversuchs gegenübergestellt.

III.5.1 Versuchskonzept

Das Versuchskonzept der Fahrsimulatoruntersuchung sieht vor im Versuch die folgenden drei Hypothesen abzuprüfen [Dau13]:

1. **Wirksamkeit von Appellen**:

   Die Aufforderung, möglichst effizient zu fahren, führt (auch ohne System) zu einer wirtschaftlicheren Fahrweise (ohne die Fahrtzeit unverhältnismäßig zu erhöhen).

   Unabhängige Variable: Appell.

2. **Wirksamkeit des Systems**:

   Bei Verwendung des Virtuellen Fahrtrainers stellt sich eine effizientere Fahrweise ein, als ohne System (ohne die Fahrtzeit unverhältnismäßig zu erhöhen).

Unabhängige Variable: Systemeinsatz.

3. **Fertigkeitszuwachs bzw. Lerneffekt aufgrund der Nutzung des Systems**:

   Die Versuchsteilnehmer adaptieren die Anweisungen des Virtuellen Fahrtrainers und steigern dadurch ihre Fertigkeit effizient zu fahren.

   Unabhängige Variable: Systemerfahrung.

Um die drei Hypothesen in einem Within-Subject-Design überprüfen zu können, sind mindestens vier Versuchsfahrten erforderlich. Das bei Bestätigung der drei Versuchshypothesen zu erwartende Ergebnis ist qualitativ in Abbildung 30 dargestellt. Die Operationalisierung der drei unabhängigen Variablen „Appell", „Systemeinsatz" und „Systemerfahrung" erfolgt über den Kraftstoffverbrauch.

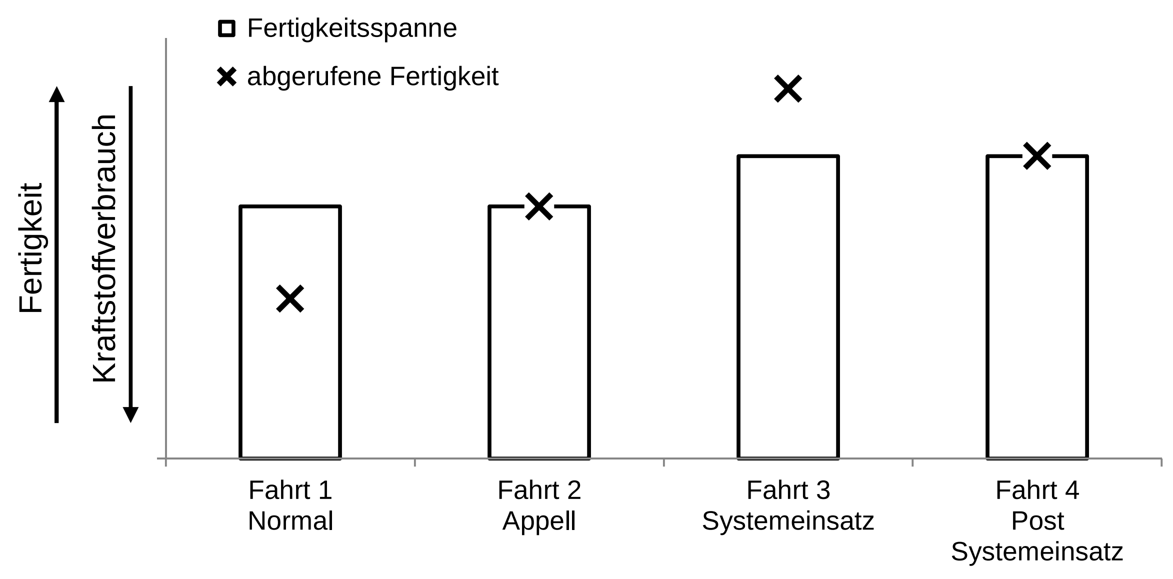


Abbildung 30: Darstellung der Versuchshypothesen und des Einflusses der verschiedenen Treatments auf die Fertigkeit im Kontext effizienten Fahrens

Im Fokus der Untersuchung steht mit Versuchshypothese 2 die Frage, ob der Virtuelle Fahrtrainer wirksam ist und die Fahrweise verbessern kann. Jedoch fahren Fahrzeugführer nicht immer gleich effizient. Untersuchungen zeigen, dass Pkw-Fahrer aufgrund einer Aufforderung ihren Kraftstoffverbrauch im Vergleich zur üblichen Fahrweise reduzieren können [Voo01, S. 131], [Küs87, S. 90]. Hypothese 1 konnte also für Autofahrer bereits bestätigt werden. Der Anspruch des Virtuellen Fahrtrainers ist es, den Kraftstoffverbrauch über die Fertigkeitsgrenzen des Fahrers hinaus zu reduzieren. Daher werden die teilnehmenden Lkw-Fahrer nach einer ersten, „normalen" Fahrt auf der zweiten Versuchsfahrt mittels Appell aufgefordert möglichst kraftstoffsparend zu fahren, ohne jedoch ihre Durchschnittsgeschwindigkeit zu reduzieren. Dadurch sollen die Fahrer das Maximum ihrer Fertigkeiten abrufen.

Auf der dritten Fahrt kommt im Anschluss zum ersten Mal der Virtuelle Fahrtrainer zum Einsatz. Unter der Anweisung effizient zu fahren, wird der Proband darauf hingewiesen, dass ihm nun ein System unterstützend zur Seite steht. Wird der Kraftstoffverbrauch weiter reduziert, so darf angenommen werden, dass der ViFa wirksam ist. Der Fahrer kann unter Zuhilfenahme des Virtuellen Fahrtrainers effizienter Fahren, als seine Fertigkeiten eigentlich zulassen.

Im Idealfall gelingt es mithilfe des Virtuellen Fahrtrainers nicht nur die Fahrweise während des aktiven Einsatzes des Systems positiv zu beeinflussen, sondern Wissen zu vermitteln bzw. die Fertigkeitsspanne zu erweitern. Dadurch könnten Fahrer von dem System auch dann profitieren, wenn es nicht verfügbar oder ausgeschaltet ist. Eine Adaption von Systemanweisungen durch den Fahrer kann zudem als positiver Indikator bzgl. der Akzeptanz interpretiert werden: Erscheinen dem Fahrer die Hinweise des Virtuellen Fahrtrainers nicht schlüssig, so wird er dem Vorschlag des Systems wenig Akzeptanz entgegenbringen. Dann ist auch nicht davon auszugehen, dass der Fahrer die vorgeschlagene Fahrweise übernimmt. Ob der kurzfristige Einsatz des ViFa bereits zu einem Lerneffekt führt, soll die Überprüfung der Versuchshypothese 3 zeigen. Dazu wird auf der vierten Fahrt das System wieder deaktiviert.

Das aus den Hypothesen abgeleitete Versuchsdesign orientiert sich am Design von VAN DER VOORT [VOO01, S. 98–100]. Der Versuchsplan ist in Abbildung 31 dargestellt. Die Versuchsteilnehmer werden auf zwei Gruppen verteilt: Die Systemgruppe und die Vergleichsgruppe. Während die Systemgruppe alle drei Treatments erfährt (Appell, Systemeinsatz und Systemerfahrung), wird die Vergleichsgruppe lediglich mit dem „Appell“ konfrontiert. Die Vergleichsgruppe wird eingeführt um Zeit- und Reihenfolgeeffekte auf den Fahrten 2 bis 4 identifizieren zu können. Auf eine „echte“ Kontrollgruppe (ohne jegliches Treatment) wird zugunsten der Testökonomie verzichtet.

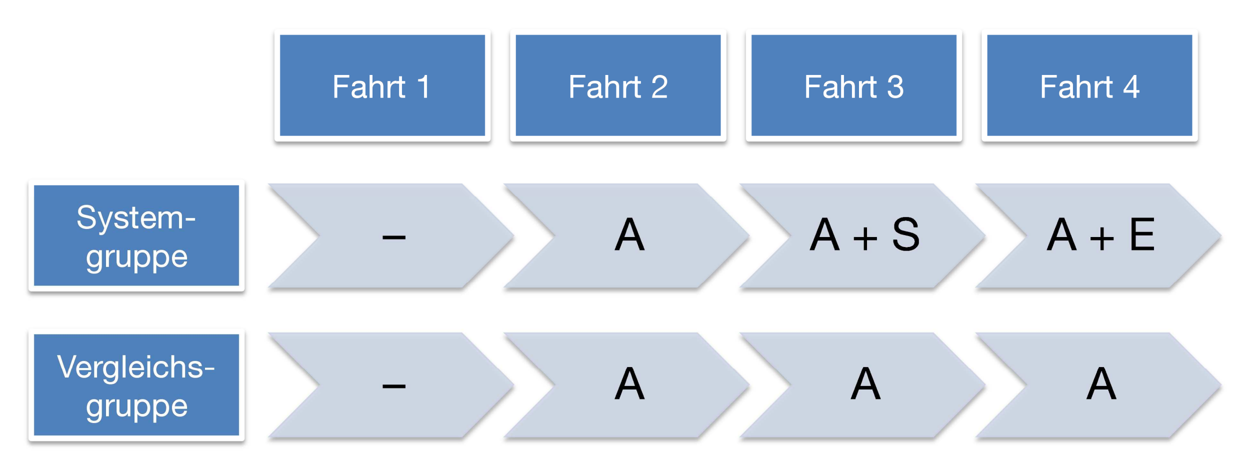


Abbildung 31: Versuchsplan mit zwei Gruppen, vier Fahrten und den Treatments der unabhängigen Variablen (– = kein Treatment, A = Appell, S = Systemeinsatz, E = Systemerfahrung) (modifiziert übernommen aus [Dau13])

III.5.2 Ausstattung und Versuchseinrichtung

Der Versuch wird am dynamischen Lkw-Simulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik durchgeführt [FTM14], [Neg07]. Abbildung 32 zeigt den Simulator mit Bewegungssystem, Fahrerkabine und Sichtsystem. Als Simulationssoftware wird SILAB 3.0 verwendet [WIV14].

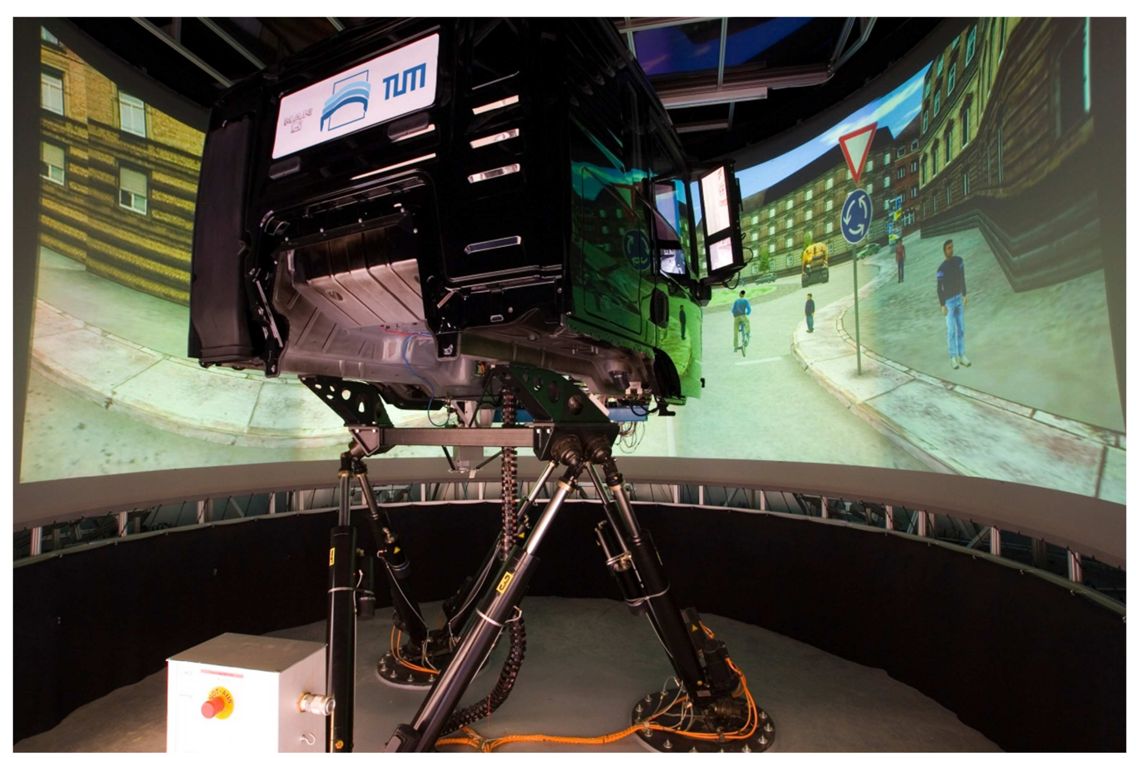


Abbildung 32: Dynamischer Lkw-Simulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik [FTM14]

III.5.3 Funktionale Integration des Virtuellen Fahrtrainers in die Simulationsarchitektur

Der Einsatz von Fahrsimulatoren ermöglicht funktionale Illusionen zu erzeugen. In der virtuellen Realität der Simulation können beispielsweise Funktionen fingiert werden, für deren Umsetzung in der Realität schlichtweg keine geeignete Sensorik existiert. Darüber hinaus besteht aber auch die Möglichkeit, die potentiellen Nutzer von Systemen bereits sehr früh in den Entwicklungsprozess zu integrieren – ggf. bereits bevor eine rein technisch-orientierte Entwicklung überhaupt stattfindet [Moh09]. Funktionen werden dann nur sehr rudimentär umgesetzt, ohne Qualitätsmerkmale wie etwa Robustheit oder Adaptivität in besonderem Maße zu berücksichtigen. Im Kontext von prädiktiven Verbrauchsassistenzsystemen können beispielsweise Ausrollhinweise getriggert erzeugt werden [Moh09]. Dadurch kann auf die Entwicklung eines Modells zur Bestimmung der Ausrollzeitpunkte verzichtet werden. Stattdessen muss für jeden Ausrollvorgang ein geeigneter Trigger gelegt werden.

Zu Beginn der Planungen des Fahrsimulatorversuchs ist die Entwicklung des ViFa-Prototyps bereits weit fortgeschritten. Außerdem entspricht die Busarchitektur des Fahrsimulator-Mockups weitestgehend dem Serienstand der MAN-Lastkraftwagen. Daher wird entschieden, die Funktionen des Virtuellen Fahrtrainers nicht zu fingieren sondern den Prototyp in der Fahrsimulatoruntersuchung einzusetzen. Aus der daraus resultierenden tiefen funktionalen Integration ergeben sich folgende Vorteile:

- Die Versuchsteilnehmer werden mit dem tatsächlichen und nicht mit einem hypothetischen Entwicklungsstand des ViFa konfrontiert. Alle Erkenntnisse über Stärken und Schwächen des Systems beziehen sich also ebenfalls auf den vorliegenden Entwicklungstand. Notwendige Änderungen können effektiv identifiziert werden.

- Durch die Integration des Virtuellen Fahrtrainers in die Architektur des Fahrsimulators entsteht eine Hardware-in-the-Loop-Umgebung (HIL-Umgebung). Da am Fahrsimulator zudem spezifische Szenarien realitätsnah nachgebildet werden können, ist eine effiziente Überprüfung der Systemfunktionen.

Diesen Vorteilen steht der erhöhte Aufwand bei der Integration gegenüber. Es muss sichergestellt werden, dass alle Signale im Fahrsimulator vorhanden sind, die für die Funktion des Systems unerlässlich sind.

Die Logik des Virtuellen Fahrtrainers ist auf einer Rapid-Control-Prototyping-Plattform (RCP-Plattform) umgesetzt. Auf dieser Plattform laufen sowohl die Algorithmen der Situations- als auch die der Fahrfehlererkennung. Die Algorithmen benötigen zur Interpretation der Situation und der Fahrweise Daten von zwei unabhängigen Funktionseinheiten: Dem Fahrzeugbus und einem Vorausschaumodul. Über den Fahrzeugbus kann auf eine Vielzahl von Fahrzeug- und Sensordaten zurückgegriffen werden, die den Serienstand aktueller Lkw widerspiegeln. Das Vorausschaumodul stellt Informationen zum vorausliegenden Streckenabschnitt zur Verfügung (z. B. Steigungsdaten). Im Realfahrzeug werden dazu eine GPS-basierte Ortung sowie digitale, elektronische Kartendaten genutzt. Wird von der Fahrfehlererkennung eine suboptimale Fahrweise erkannt, so wird eine Anweisung generiert. Die Übermittlung der Anweisungen an den Fahrer erfolgt über ein externes Ausgabegerät (visuell und akustisch).



Abbildung 33: Externes Ausgabegerät des Virtuellen Fahrtrainers im Mockup des Fahrsimulators

Für eine ordnungsgemäße Funktionsweise des Virtuellen Fahrtrainers im Fahrsimulator muss daher gewährleistet werden, dass sowohl die Daten des Fahrzeugbusses als auch die des Vorausschaumoduls in plausibler Form vorliegen. Da die Busarchitektur des Fahrsimulators weitestgehend eine Abbildung der MAN-Serienarchitektur darstellt und wichtige Sensoren, die nicht physikalisch vorhanden sind, virtuell modelliert werden, stellte die Schnittstelle zum Fahrzeugbus keine große Herausforderung dar und konnte ohne große Aufwände im FTM-Simulator realisiert werden.

Das Vorausschaumodul greift beim Einsatz im Realfahrzeug jedoch auf eine satellitenbasierte Positionsbestimmung zurück. Zudem nehmen die elektronischen Kartendaten Bezug auf reale Straßen. Im Fahrsimulator werden hingegen fiktive Strecken erstellt. Auch wenn diese sich fast beliebig anpassen lassen, wäre eine exakte Kopie von einer real existierenden

Fahrstrecke im Fahrsimulator nur mit großem Aufwand darstellbar. Aus diesem Grund wurde für den Fahrsimulatorversuch ein gesondertes Vorausschaumodul entwickelt und implementiert. Um dieses Modul mit Daten versorgen zu können, muss eine neu erstellte Strecke zunächst abgefahren werden. Dabei wird sowohl das Höhenprofil aufgezeichnet als auch ein Datenfeld erzeugt, dass über Infrastrukturmerkmale verfügt. Das auf diese Weise implementierte Vorausschaumodul gewährleistet, dass der Virtuelle Fahrtrainer im Fahrsimulator Anweisungen zur vorausschauenden Fahrweise ausgeben kann (z. B. „Jetzt bitte Fuß vom Gas! Rollen vor Kurve"). Somit konnte der Prototyp des Virtuellen Fahrtrainers mit seinem gesamten Funktionsumfang im Fahrsimulator in Betrieb genommen werden.

III.5.4 Integration des Längsdynamikmodells in die Simulationssoftware

Während der Projektlaufzeit ist am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik ein Längsdynamik-Modell für Lastkraftwagen entwickelt worden. Damit die im Fahrsimulatorversuch erzielten Ergebnisse möglichst Aussagekräftig hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs sind, wird dieses Längsdynamikmodell in die Simulationsumgebung eingebunden. Im Versuch wird sowohl die Längsdynamik (Beschleunigungen und Verzögerungen) als auch der Kraftstoffverbrauch durch dieses validierte und hinreichend genaue Modell berechnet [Süß13].

Das Modell der Längsdynamik wird mit der Software MATLAB/Simulink erstellt [Mat14]. Für den Einsatz im Fahrsimulator muss das Modell angepasst werden. Die wesentlichen Änderungen beziehen sich auf die ausgewählten Fahrzeugparameter sowie die Integration der fahrsimulatorspezifischen Schaltsteuerung. Im Anschluss an die Anpassungen wird das Simulink-Modell in C++-Code übersetzt und mithilfe einer Entwicklungsschnittstelle in die Simulationssoftware SILAB integriert.

Aufgrund einer numerischen Inkompatibilität bei der Integration des Modells in die Fahrsimulatorumgebung wird im Längsdynamikmodell keine Schubabschaltung aktiviert. Ein lösen des Fahrpedals führt daher zu einem freien Rollen (Antriebsmoment gleich Null) mit Kraftstoffverbrauch in Höhe des Leerlaufverbrauchs. Die Inkompatibilität wird während der Versuchsdurchführung entdeckt. Um die Ergebnisse für alle Teilnehmer vergleichbar zu halten, wird das Modell jedoch nicht mehr geändert und dieser Modellzustand für die Dauer der Versuche beibehalten.

III.5.5 Versuchsvorbereitung

Damit die drei Versuchshypothesen „Wirksamkeit von Appellen", „Wirksamkeit des Systems" und „Lerneffekt aufgrund der Systemnutzung" mithilfe von vier Fahrten überprüft werden können (vgl. III.5.1), werden vier Strecken erstellt. Die Mehrzahl der Anweisungen des Virtuellen Fahrtrainers bezieht sich auf Szenarien, die im Schwerpunk auf Landstraßen auftreten. Daher sollen die Strecken etwa 25 % Autobahn-, 70 % Landstraßen- und 5 % Ortsstraßenanteile aufweisen. Diese Strecken werden mit Szenarien befüllt, die eine suboptimale Fahrweise erwarte lassen und dadurch Anweisungen des Virtuellen Fahrtrainers provozieren.

Bei der Gestaltung von Fahrsimulatorversuchen mit Messwiederholungen besteht im Allgemeinen ein Interessenkonflikt. Zum einen soll eine hohe Vergleichbarkeit zwischen den Messwiederholungen sichergestellt, zum anderen aber eine Gewöhnung an Strecken und Szenarien ausgeschlossen werden. Würden auf allen Fahrten exakt die gleichen Strecken verwendet werden, so ließen sich die einzelnen Szenarien und Situationen zwar sehr gut miteinander vergleichen, allerdings könnten gemessene Effekte auf späteren Fahrten nicht

mehr zweifelsfrei den untersuchten unabhängigen Variablen zugeschrieben werden (Systemnutzung und Appell). Stattdessen wäre die Hypothese berechtigt, dass die Effekte durch die Gewöhnung der Fahrer an die Strecke entstanden sind.

Um einen guten Kompromiss zwischen der Vergleichbarkeit und der Vermeidung von Gewöhnungseffekten zu erreichen, werden verschiedene Maßnahmen umgesetzt. Zunächst besteht jede Strecke aus Hauptmodulen, die eine Vergleichbarkeit sicherstellen, sowie Übergangsmodulen, die unterschiedlich sind und daher einer Gewöhnung entgegenwirken. Sowohl die Szenarien bezüglich einer wirtschaftlichen Fahrweise als auch die Streckenführung (Topografie und Kurvenverlauf) der Hauptmodule sind auf allen vier Strecken grundsätzlich identisch (bis auf das Hauptmodul „Ortschaft“). Somit können die Szenarien dieser Hauptmodule auf den verschiedenen Fahrten sehr gut miteinander verglichen werden. Um die Wiedererkennbarkeit auf den Hauptmodulen hinsichtlich Strecken und Szenarien dennoch so gering wie möglich zu halten, werden folgende Maßnahmen ergriffen, die kaum Beeinflussungen der Vergleichbarkeit erwarten lassen:

- Die Landschaftstypen auf den Hauptmodulen der vier Strecken unterscheiden sich (z. B. Bewaldung, Wiesen, Hügel etc.).
- Der Kurvenverlauf der Hauptmodule auf jeweils zwei Strecken entspricht einer Achsspieglung des Kurvenverlaufs der anderen beiden Strecken.
- Die Hauptmodule werden auf den vier Strecken in unterschiedlicher Reihenfolge durchfahren.
- Einzelne, markante Szenarien werden in den verschiedenen Strecken entweder auf verschiedenen Modulen platziert (z. B. Ampelhalt innerorts vs. außerorts) oder in einem anderen Kontext dargestellt (z. B. Baustellenampel vs. feste Ampelanlage).

Insgesamt werden für den Fahrsimulatorversuch die sechs Hauptmodule „Start“, „Autobahn“, „Landstraße 1“, „Landstraße 2“, „Ortschaft“ und „Ende“ entwickelt.

Die Übergangsmodule sind zwischen den Hauptmodulen angeordnet. Dadurch erschweren diese es den Versuchsteilnehmern sich Streckenverläufe und Szenarien einzuprägen. So folgt auf der ersten Strecke nach der Autobahnabfahrt ein Kreisverkehr während auf einer anderen Strecke der Anschluss zum nächsten Hauptmodul über eine T-Kreuzung realisiert ist. Auch auf den Übergangsmodulen sind Szenarien vorgesehen, die eine Meldung des Virtuellen Fahrtrainers bei suboptimaler Fahrweise nach sich ziehen. Diese Übergangsmodule werden bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

In Abbildung 34 wird exemplarisch anhand des Hauptmoduls „Landstraße 1“ veranschaulicht, wie in den Modulen eine suboptimale Fahrweise provoziert wird. Nachdem der Versuchsteilnehmer in das Modul einfährt, begibt er sich zunächst in eine Steigung an die sich unmittelbar ein Gefälle anschließt. Idealerweise nutzt der Fahrer vor dem Gefälle die vorhandene kinetische Energie und lässt sein Fahrzeug in das Gefälle rollen. In Abhängigkeit von der Strecke nähert er sich anschließend einem anderen Verkehrsteilnehmer, der aufgrund eines Abbiegemanövers verzögert. Diese Verzögerung sollte vom Fahrer frühzeitig antizipiert werden. Das Szenario „Auflaufen auf ein Vorderfahrzeug“ wird alternativ im Hauptmodul „Ende“ umgesetzt. Bevor das Modul „Landstraße 1“ verlassen wird, fahren die Versuchsteilnehmer über eine weitere Kuppe.



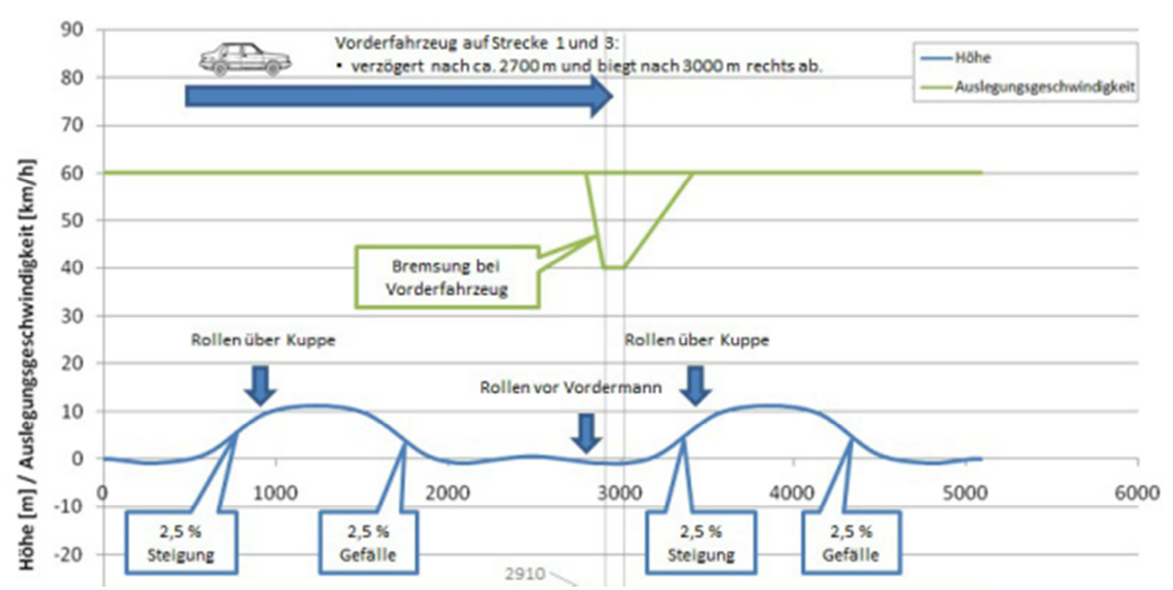


Abbildung 34: Hauptmodul „Landstraße 1“ mit Höhenprofil und Auslegungsgeschwindigkeit sowie Szenarien zur Provokation einer hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit suboptimalen Fahrweise [Bra13]

Die auf diese Art modellierten Strecken haben eine Länge von etwa 20 km. Zwischen der kürzesten und längsten Strecke variieren die Längen um etwa 600 m, da die Übergangsmodule in den Strecken unterschiedlich sind. Daraus resultiert eine Fahrzeit von etwas mehr als 20 min.

III.5.6 Versuchsdurchführung

Die Fahrsimulatoruntersuchung wird im vierten Quartal 2012 durchgeführt. N = 41 männliche Lkw-Fahrer aus der Probandendatenbank des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik kommen der Einladung nach und nehmen an der Untersuchung teil. Ein Teilnehmer bricht den Versuch aufgrund einer Simulatorunverträglichkeit vorzeitig ab. Die Lkw-Fahrer werden zufällig einer der beiden Versuchsgruppen zugeteilt (Systemgruppe oder Vergleichsgruppe).

Nach der Begrüßung und der Unterschrift der Einwilligungserklärung wird den Teilnehmern der Fahrsimulator in einer kurzen Bildschirmpräsentation vorgestellt. Dabei wird ihnen ebenfalls ein fiktiver Grund für die Versuchsdurchführung vorgeben. Die Teilnehmer werden informiert, dass ein Fahrzeugmodel entwickelt wird und dieses mithilfe der Versuchsdaten validiert werden soll. Daher sollten die Probanden in gleicher Weise fahren, wie sie dies auch im Alltag tun.

Einige Anweisungen des Virtuellen Fahrtrainers zielen auf die zweckmäßige Bedienung der Längsregelsysteme ab. Je nach Szenario fordert der ViFa dazu auf, ACC oder den Limiter zu aktivieren. Es kann nicht angenommen werden, dass alle Fahrer mit der Bedienung dieser Systeme vertraut sind. Zum einen setzen ggf. nicht alle Teilnehmer die Systeme im Alltag ein und zum anderen unterscheidet sich die Bedienung der Systeme abhängig vom Fahrzeughersteller. Daher wird den Probanden in der Einweisungspräsentation die Funktionsweise der drei von MAN eingesetzten Längsregelsysteme Tempomat, ACC und Limiter erklärt und die Bedienung in der Kabine des Fahrsimulators demonstriert.

Damit sich die Versuchsteilnehmer mit dem Fahrsimulator vertraut machen können, wird eine Eingewöhnungsfahrt vor dem Start der Versuchsläufe durchgeführt. Auf dieser etwa 5-

minütigen Autobahnfahrt werden die Probanden aufgefordert, die drei Längsregelsysteme aufzurufen und mit spezifischen Geschwindigkeiten zu aktivieren.

Nach der Eingewöhnungsfahrt absolvieren die Teilnehmer die vier Versuchsfahrten. Jeder Proband durchfährt alle vier Strecken, wobei die Reihenfolge der Strecken permutiert wird. Vor, zwischen und nach den vier Versuchsläufen werden Befragungen zu demographischen Daten, der Erfahrung mit sowie der Einstellung zu Fahrerassistenzsystemen, der Teilnahme von Trainingskursen und der Bewertung des Virtuellen Fahrtrainers durchgeführt. Die Vergleichsgruppe erhält zudem Fragen die das Wissen bzgl. einer effizienten Fahrweise abprüfen.

III.5.7 Ergebnisse

Die Daten des Fahrsimulatorversuchs werden mithilfe eines linear gemischten Regressionsmodells (LMM, aus dem Engl. für Linear Mixed Model) analysiert [Dau13]. Die Regressionsanalyse mittels LMM ermöglicht es, Unterschiede der beobachteten Variablen (Kraftstoff-Streckenverbrauch und Durchschnittsgeschwindigkeit) einem Treatment zuzuweisen (Anweisung, Systemeinsatz oder Systemerfahrung) und deren Signifikanzwerte zu ermitteln. Dies ist mittels LMM-Analyse auch dann möglich, wenn während einer Beobachtung mehrerer Treatments vorliegen (z. B. auf Fahrt 2 und 3 der Systemgruppe).

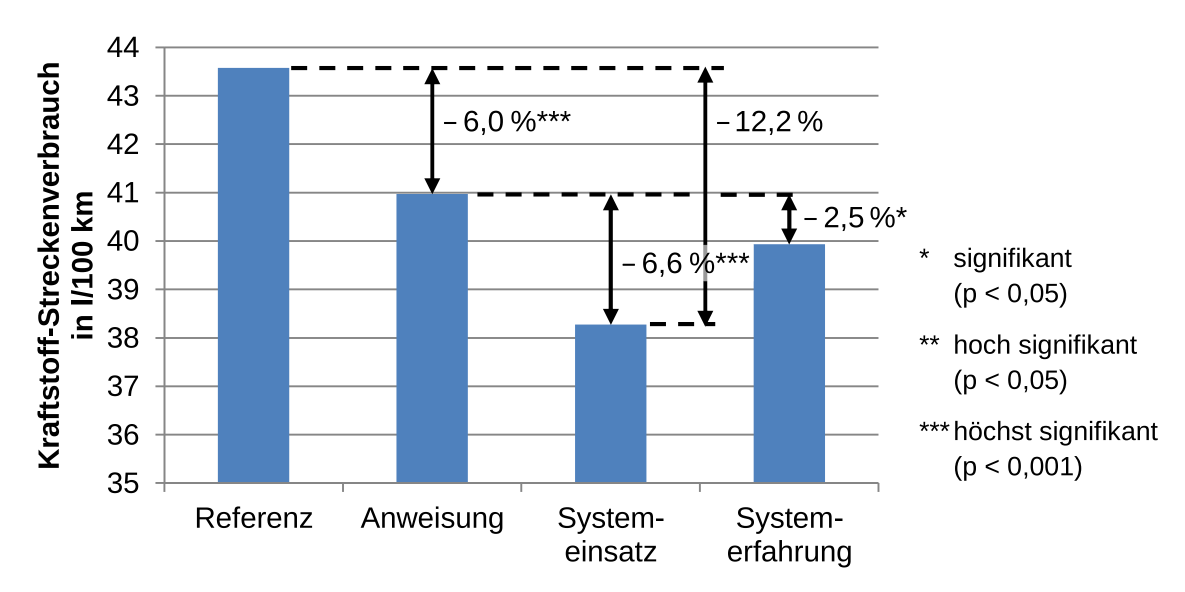


Abbildung 35: Veränderung des Kraftstoff-Streckenverbrauchs aufgrund der Treatments Anweisung, Systemeinsatz und Systemerfahrung gemäß Regressionsanalyse mittels LMM (eigene Darstellung, Daten entnommen aus [Dau13])

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sind für den Kraftstoff-Streckenverbrauch in Abbildung 35 und für die Durchschnittsgeschwindigkeit in Abbildung 36 dargestellt. Die Anweisung möglichst effizient zu fahren führt demnach im Vergleich zur Referenz (kein Treatment) bereits zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um 6 %. Bemerkenswert ist, dass diese Einsparung durch die Teilnehmer erzielt wird obwohl die Durchschnittsgeschwindigkeit um 1,3 % zunimmt. Der Einsatz des Virtuellen Fahrtrainers auf Fahrt 3 der Systemgruppe führt zu einer weiteren Abnahme des Verbrauchs um 6,6 % im Vergleich zur Anweisung und damit um 12,2 % verglichen mit der Referenz. Im Gegensatz zur Anweisung führt der Systemeinsatz jedoch zu einer leichten Zunahme der Fahrtzeit: Im Vergleich zur Anweisung, auf

die sich für den Systemeinsatz die Signifikanzwerte beziehen, sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit um 2,1 %. Gegenüber der Referenz entspricht dies einer relativen Abnahme um 0,7 %. Auch der dritte Untersuchte Effekt, die Systemerfahrung, kann mittels Regressionsanalyse nachgewiesen werden. Zusätzlich zu dem Effekt der Anweisung kann die Systemerfahrung eine weitere Reduktion um 2,5 % erklären ohne die Durchschnittsgeschwindigkeit signifikant zu beeinflussen.

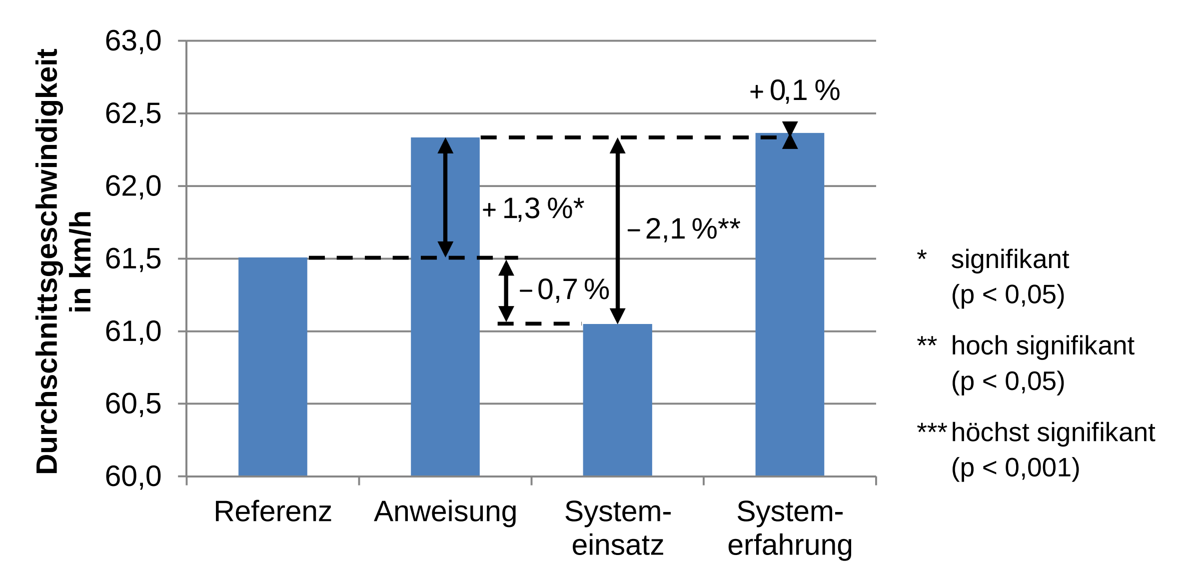


Abbildung 36: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit aufgrund der Treatments Anweisung, Systemeinsatz und Systemerfahrung gemäß Regressionsanalyse mittels LMM (eigene Darstellung, Daten entnommen aus [Dau13])

III.6 AP6 Realisierung Prototyp

Um die in der der Anforderungs- und Fahranalyse ermittelten Konzepte zur Situations- und Fahrfehlererkennung zu implementieren, wird ein vertikaler Entwicklungsansatz nach Abbildung 37 angewandt. Bei diesem Ansatz wird der Entwicklungsprozess für jeden einzelnen Fahrfehler komplett durchlaufen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Ergebnisse der einzelnen Schritte in kurzen Iterationen in die Entwicklung einfließen.

Die ermittelten Fahrfehler und die daraus resultierenden Anweisungen des Virtuellen Fahrtrainers lassen sich grundsätzlich in die zwei Kategorien „Fahrweise“ und „Fahrzeugbedienung“ unterteilen. „Fahrweise“ bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Wahl und Ausführung von Fahrmanövern (z. B. Wahl der Geschwindigkeit, Einleitung einer Verzögerung), während die „Fahrzeugbedienung“ die Art der Umsetzung der „Fahrweise“ beschreibt. Die Fahrweise beantwortet die Frage „Was macht der Fahrer?“ und die Fahrzeugbedienung die Frage „Wie macht das der Fahrer?“. Hat der Fahrer z. B. eine Geschwindigkeit gewählt die er konstant halten möchte (Fahrweise), so kann er die Geschwindigkeit entweder per Fahrpedal oder per Längsdynamikregelsystem einregeln (Fahrzeugbedienung).

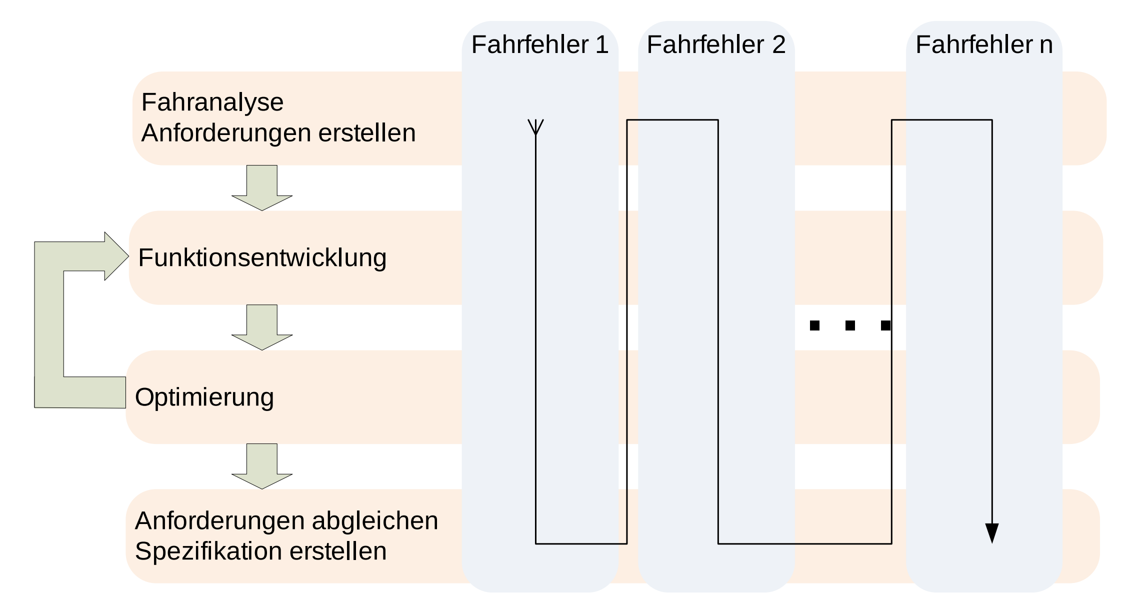


Abbildung 37: Vertikaler Entwicklungsansatz zum durchgängigen Entwurf von Funktionen zur Fahrfehler- und Situationserkennung

Die Anweisungen der Kategorie „Fahrweise“ und „Fahrzeugbedienung“ beinhalten jeweils eine ausgeprägte Subkategorie, die daher gesondert behandelt werden. Für die Kategorie der „Fahrweise“ sind das Hinweise zum „vorausschauenden Fahren“ und für die „Fahrzeugbedienung“ werden die „Handschaltempfehlungen“ einzeln geführt. Die Entwicklung von Funktionen zur Situations- und Fahrfehlererkennung gliedert sich demnach in die folgenden vier Schwerpunktbereiche:

- **Fahrweise:** Neben der vorausschauenden Geschwindigkeitsbeeinflussung kann der Fahrer während Konstantfahrphasen durch die geeignete Wahl des Geschwindigkeitsniveaus den Kraftstoffverbrauch positiv beeinflussen, indem er beispielsweise die maximale Reisegeschwindigkeit drosselt oder die Geschwindigkeit vom Vordermann antizipiert.
- **Vorausschauendes Fahren (Subkategorie der Fahrweise):** Beim vorausschauenden Fahren kommt es vor allem darauf an, die kinetische Energie des Fahrzeugs kraftstoffeffizient auszunutzen. Die Funktionen des Fahrtrainers unterstützen den Fahrer bei dieser Aufgabe, indem vorausschauende Fahrhinweise generiert werden, die es dem Fahrer ermöglichen, frühzeitig die Fahrzeuggeschwindigkeit anzupassen.
- **Fahrzeugbedienung:** Durch den sachgerechten Umgang mit den Fahrzeugbedienelementen kann Kraftstoff eingespart und Verschleiß reduziert werden. Beispielsweise wird durch Ausschalten des Motors während längerer Stillstandzeiten der Leerlaufverbrauch vermieden oder durch die Nutzung des Retarders der Bremsenverschleiß verringert.
- **Handschaltempfehlungen (Subkategorie der Fahrzeugbedienung):** Der geeignete Umgang mit Handschaltfahrzeugen kann den Verschleiß der Antriebsstrangkomponenten reduzieren und die Kraftstoffeffizienz erhöhen, wenn der Motor im günstigen Motorbetriebsbereich arbeitet. Dafür wurden Funktionen entwickelt, die Anfahrvorgänge analysieren und dem Fahrer Hinweise zum Anfahrgang und zum Umgang mit Kupplung und Fahrpedal geben. Während Konstantfahrphasen wird der ver-

brauchsgünstige Gang ermittelt und gegebenenfalls dem Fahrer ein verbrauchsgünstigerer Gang empfohlen.

Eine Übersicht der zu den vier Kategorien gehörenden und im Fahrtrainer implementierten Anweisungen gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Anweisungen des Virtuellen Fahrtrainers eingeteilt in die Kategorien „Fahrweise“, „Vorausschauendes Fahren“, „Fahrzeugbedienung“ und „Handschaltempfehlungen“

Fahrweise	Reisegeschwindigkeit nicht zu hoch wählen
	Reaktion vom Vordermann antizipieren
Vorausschauendes Fahren (Subkategorie der Fahrweise)	Geschwindigkeit vor Gefälle reduzieren
	Vor Gefälleende Geschwindigkeit erhöhen
	Ausrollen vor Infrastruktur (Ausfahrten, Ampeln, Kurven, Geschwindigkeitsbeschränkungen)
	Ausrollen vor Vordermann
Fahrzeug-bedienung	Bei konstantem Verkehrsfluss und Topografie Tempomat/ACC Nutzen
	Bei unruhigem Verkehrsfluss Limiter Nutzen
	Kickdown vermeiden
	Beschleunigen mit hoher Lastanforderung über das Fahrpedal
	Keine hohe Leistungsanforderung bei kaltem Motor
	Bei Bremsung nach Möglichkeit die verschleißfreie Dauerbremse nutzen
	Bei längeren Wartezeiten Motor abstellen
Handschalt-empfehlungen (Subkategorie der Fahrzeug-bedienung)	Fahrt im ungünstigen Motorbetriebspunkt vermeiden
	Richtigen Anfahrgang wählen
	Dosierter Umgang mit der Kupplung
	Ohne Gas anfahren

III.6.1 Fahrweise

Die Fahrweise hat einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch, da durch sie entschieden wird, wie die Energie des Kraftstoffes in Bewegungsenergie umgewandelt wird. In der Kategorie „Fahrweise“ (ohne die Subkategorie „Vorausschauendes Fahren“) sind zwei Fahr-

hinweise inkl. zugehörigen Situations- und Fehlererkennungen implementiert (Tabelle 3), die beide in einer zweckmäßigen Wahl der Fahrzeuggeschwindigkeit resultieren.

In Deutschland gilt für schwere Nutzfahrzeuge eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h [StV13]. Außerdem müssen nach der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung alle „Lastkraftwagen, Zugmaschinen und Sattelzugmaschinen mit einer zulässigen Gesamtmasse von jeweils mehr als 3,5 t (..) mit einem Geschwindigkeitsbegrenzer ausgerüstet sein“ [StV12]. Der Begrenzer darf jedoch auf 90 km/h eingestellt werden [StV12]. Dieser Umstand erklärt, weshalb im Alltag die Lkw mit Geschwindigkeiten jenseits der 80 km/h beobachtet werden können.

Der Luftwiderstand nimmt quadratisch mit der gefahrenen Geschwindigkeit zu. Daher wird bei höheren Geschwindigkeiten mehr Energie benötigt, was wiederum in einem höheren Kraftstoffverbrauch resultiert. Obwohl keine wissenschaftlichen Untersuchungen zu diesem Thema bekannt sind, wird in der Literatur einer Reduktion der Höchstgeschwindigkeit im Fahreinsatz von ca. 90 km/h um 5 km/h eine Einsparung der Größenordnung 1,6 bis 2 l/100 km zugeschrieben ([Ham08, S. 4], [Vol11] und [Dos06] zitiert nach [Moh13, S. 58]). Eigene Simulationen ohne Umgebungsverkehr ergeben je nach Topografie der Autobahn Reduktionen zwischen 1,4 und 1,8 l/100 km. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit einer Geschwindigkeit von 85 km/h oder niedriger besser im Autobahnverkehr „mitgeschwommen“ werden kann. Dadurch können unnötige Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge vermieden werden. Zudem erlaubt eine derartige Fahrweise eine effizientere Ausnutzung der Topografie in Gefällen. Ein Fahrzeug das bereits mit 90 km/h in ein Gefälle einfährt wird unmittelbar vom Geschwindigkeitsbegrenzer eingebremst. Die Beschleunigung auf 90 km/h erfolgte also vollständig aus der chemischen Energie des Kraftstoffes. Fährt der Lastkraftwagen jedoch mit einer niedrigeren Geschwindigkeit ins Gefälle ein, so sorgt die Hangabtriebskraft für eine Beschleunigung auf 90 km/h, ohne dass dafür Treibstoff verbrannt werden muss.

Wählt der Fahrer eine Reisgeschwindigkeit jenseits der 85 km/h, empfiehlt der Virtuelle Fahrtrainer daher die Geschwindigkeit auf 85 km/h zu reduzieren. Wichtig für diesen Fahrhinweis ist die zuverlässige Erkennung der Fahrerabsicht. Die Fahrerabsicht wird durch den Algorithmus mittels Dauer und Höhe der Überschreitung bewertet. Dadurch werden Auslösungen bei kurzfristigen und kleinen Geschwindigkeitsüberschreitungen vermieden. Eine weitere wichtige Rolle für die richtige Detektion dieses Fahrfehlers kommt der Situationserkennung zu. Es gibt einige Fahrsituationen, in denen eine Ausgabe der Anweisung unangebracht wäre. Dies sind Überholmanöver, Fahrten auf Gefällestrecken und Streckenabschnitte vor Steigungen. Vor Steigungen sollte der Fahrer nach Möglichkeit Beschleunigen um möglichst viel kinetische Energie in die Steigungsfahrt einzubringen. Die Anweisung, die Reisgeschwindigkeit zu reduzieren, wäre deshalb unangebracht.

Der zweite Fahrhinweis bzgl. der Fahrweise fordert den Fahrer ebenfalls auf seine Geschwindigkeit zu reduzieren. Der Grund für diese Anweisung ist jedoch nicht ein zu hoher Luftwiderstand, sondern ein Vorderfahzeug mit unruhiger Fahrweise bzw. ausgeprägten Geschwindigkeitsschwankungen. Durch eine Reduktion der Geschwindigkeit soll der Abstand zum Vorderfahrzeug vergrößert werden und damit unnötige Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge vermieden werden.

III.6.2 Vorausschauendes Fahren

Bisherige Untersuchungen lassen vermuten, dass eine frühzeitige Geschwindigkeitsanpassung unter Ausnutzung von Rollphasen ein sehr hohes Potential zur Kraftstoffreduktion aufweist, da hierbei unnötige Bremseingriffe vermieden werden können. Durch die hohe Fahrzeugmasse können die Rollphasen jedoch außerordentlich lang ausfallen, sodass oftmals auch versierte Fahrer nicht in der Lage sind geschwindigkeitsbegrenzende Elemente frühzeitig zu erkennen. Mittels Kartendaten ist es möglich, den vorausliegenden Streckenabschnitt zu analysieren und dem Fahrer frühzeitige Handlungshinweise zu geben.

Um den Ausrollzeitpunkt zu bestimmen, wird auf ein von Huber [Hub08] entwickeltes Verfahren zurückgegriffen. Dabei wird der vor dem Fahrzeug liegende Streckenabschnitt simulativ mit einem physikalischen Modell eines im Schubbetrieb rollenden Fahrzeugs durchfahren. Die daraus gewonnene Geschwindigkeitstrajektorie wird, wie in Abbildung 38 exemplarisch dargestellt, mit der Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit verglichen. Sobald sich ein Schnittpunkt ergibt, wird der Fahrer zum Ausrollen des Fahrzeugs aufgefordert, wobei mit einem unteren Geschwindigkeitsschwellwert sichergestellt wird, dass während des Rollvorgangs das Fahrzeug nicht zu langsam wird und dadurch nachfolgende Verkehrsteilnehmer behindert.

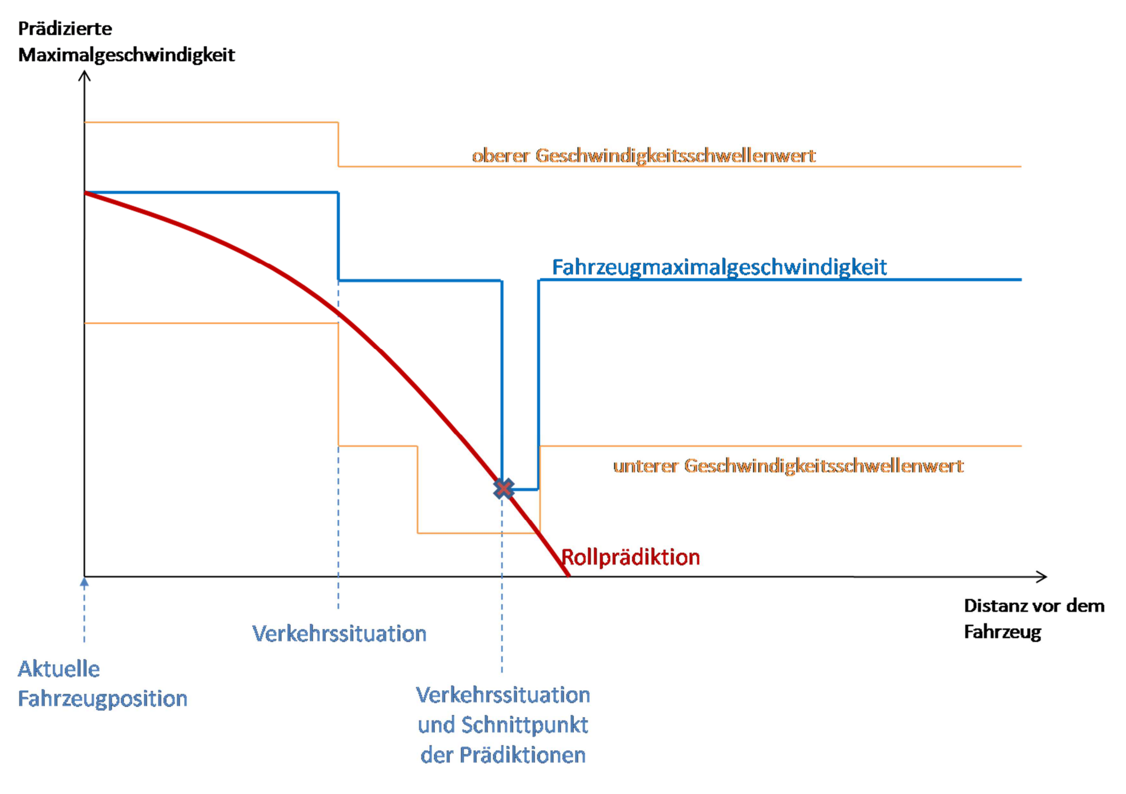


Abbildung 38: Bestimmung des Ausrollzeitpunkts durch Vergleich der Rollprädiktion mit der infrastrukturbedingten Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit

Das Ergebnis dieser Berechnung wird an die Fahrerschnittstelle weitergegeben und wie in Abbildung 39 dargestellt an den Fahrer übermittelt.

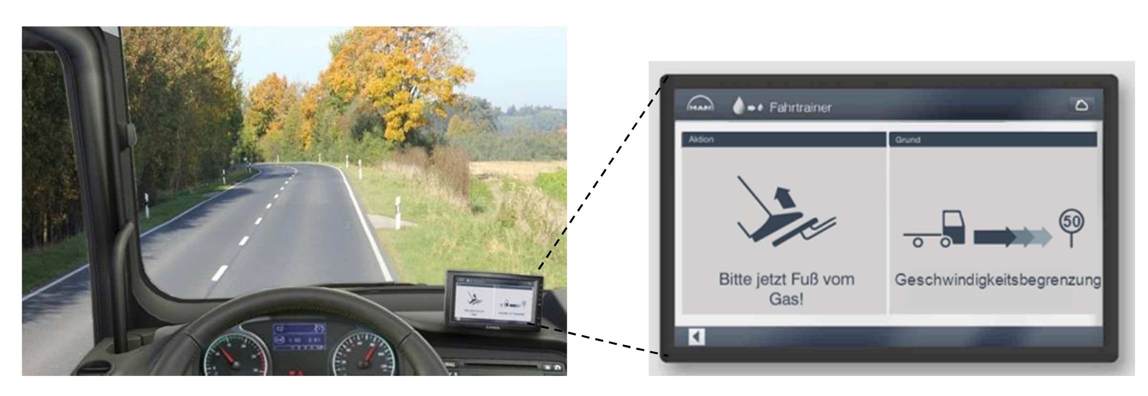


Abbildung 39: Vorausschauender Fahrhinweis vor einer verdeckt liegenden Ortseinfahrt

III.6.3 Fahrzeugbedienung

Im Unterschied zu den Systemanweisungen zur Fahrweise und zum vorrausschauenden Fahren beziehen sich die Anweisungen zur Fahrzeugbedienung nicht direkt auf die Manöverebene, sondern vielmehr darauf wie bzw. in welcher Art die Manöver umgesetzt werden. Zwei Anweisungen beziehen auf die Bedienung der Längsregelsysteme während Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit, drei auf die Art der Beschleunigung, eine auf Bremsvorgänge und eine weitere den Fahrzeugbetrieb im Stillstand (Tabelle 3).

- **Bedienung der Längsregelsysteme während Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit:** Erlaubt es der Verkehrsfluss und ist die Topografie eben, so ist es zweckmäßig mittels Längsregelsystem (Tempomat oder besser ACC) für eine ruhige Fahrweise zu sorgen [Ben14]. Entsprechend empfiehlt der Virtuelle Fahrtrainer auf ebenen Autobahnen das ACC-System zu aktivieren. Verfügt das Abstandsregelsystem über keine Streckenprädiktion[3], ist in verkehrlich unruhigen Situationen und bei anspruchsvoller Streckenführung (Topografie und Kurven) die Verwendung des Geschwindigkeitsbegrenzers/Limiters zu bevorzugen. Dies verhindert Geschwindigkeitsspitzen, ermöglicht es aber dem Fahrer frühzeitig auf langsamere Fahrzeuge, Kurven und Gefälle mittels Gaswegnahme zu reagieren. Der Virtuelle Fahrtrainer empfiehlt den Einsatz des Limiters auf Landstraßen und in Ortschaften.
- **Korrekte Bedienung während Beschleunigungsvorgängen:** Da der Kraftstoffverbrauch im Nutzfahrzeugbereich von übergeordneter Bedeutung ist, werden Fahrzeuge mit automatisiertem Getriebe so appliziert, dass eine Beschleunigung mit vollständig betätigtem Gaspedal ohne Aktivierung der Kickdown-Funktion zur Betriebsweise im effizienten Bereich des Motorkennfeldes führt (Abbildung 40). Eine Ausnahme stellt der Betrieb mit kaltem Motor dar. In der Kaltstartphase ist der Schmierfilm noch nicht aufgebaut und der Motor hat eine größerer Reibung [Esc13, S. 392 u. 496]. Um den kalten Motor zu schonen und nicht unnötig zu verschleißen, sollte vom Fahrer nur moderat Last angefordert werden. Wenn der Motor seine Betriebstemperatur erreicht hat, ist wiederum kräftiges Beschleunigen zu bevorzugen.
- **Korrekte Bedienung während Bremsvorgängen:** Die Gesetzgebung schreibt für alle Lastkraftwagen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als neun Tonnen eine Dauerbremsanlage vor. Eingesetzt werden sowohl Motorbremseinrichtungen als

[3] Konzepte für eine prädiktive Längsführung finden sich u. a. in [Hel07], [Koc08], [Ter10] und [Rot11]

auch hydrodynamische und elektromagnetische Retarder [Brä13, S. 279 ff]. Im Gegensatz zur Radbremse arbeiten die Dauerbremsen praktisch verschleißfrei. Aus diesem Grund detektiert eine Algorithmus die Bedienung des Bremspedals. Führt der Fahrer eine längere Bremsung mittels Bremspedal aus, weist der Virtuelle Fahrtrainer im Anschluss an die Verzögerung darauf hin, nach Möglichkeit die Dauerbremseinrichtung zu verwenden.

- **Korrekte Betriebsweise im Stillstand:** Eigene Messungen zeigen, dass der Verbrennungsmotor eines schweren Lastkraftwagens im Leerlauf etwa 2 Liter Kraftstoff verbraucht. Befindet sich das Fahrzeug längere Zeit im Stillstand, weist der Virtuelle Fahrtrainer den Fahrzeugführer darauf hin, den Motor abzustellen.

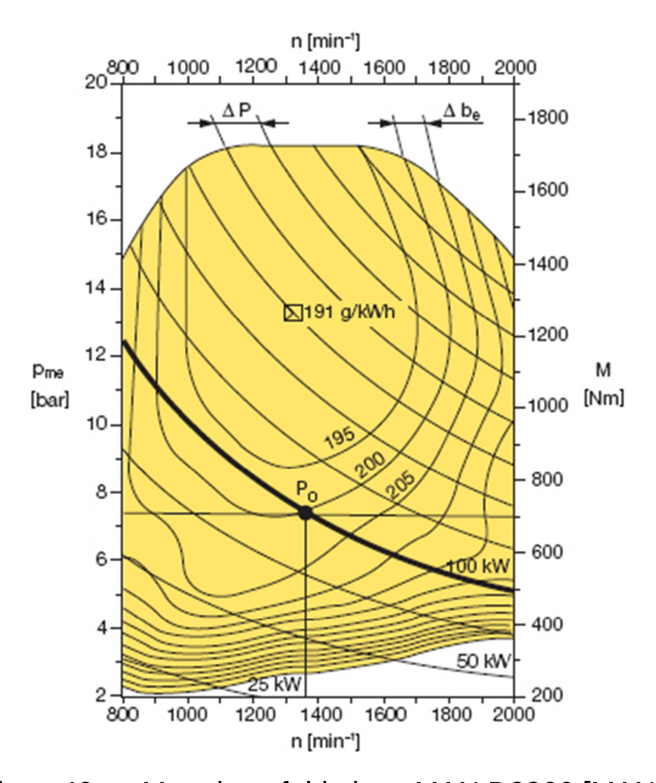


Abbildung 40: Motorkennfeld eines MAN D2866 [MAN08, S.181].

III.6.4 Handschaltempfehlungen

Gegenüber Fahrzeugen mit automatisierten Schaltgetrieben besitzen Handschaltfahrzeuge zusätzliche Freiheitsgrade. Während sich bei einem automatisierten Schaltgetriebe die Fahrereingriffe hauptsächlich auf die topografische Anpassung der Gangwahl beschränken, hat der Fahrer bei einem Handschaltfahrzeug zusätzlich großen Einfluss auf den Kupplungsverschleiß beim Anfahren und den effizienten Motorbetrieb in einem verbrauchsgünstigen Motorkennfeldbereich während Konstantfahrten.

Beim Anfahrvorgang kommt es darauf an, den Kupplungsverschleiß und die Belastung des Antriebsstrangs zu reduzieren. Hierbei ergeben sich maßgeblich drei Handlungsfelder für den Fahrer:

- **Wahl des richtigen Anfahrgangs:** Der Anfahrgang stellt den größten Einflussfaktor für den Kupplungsverschleiß dar. Dabei sinkt der Kupplungsverschleiß mit kleineren Anfahrgängen. Jedoch ist das Anfahren im kleinsten Gang meist nicht praktikabel, da

dadurch in der Folge mehr Schaltungen notwendig sind und der Anfahrvorgang unnötig verlängert wird. Daher ist es aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll, einen Anfahrgang zu wählen, der ein zügiges Anfahren ermöglicht, bei dem der Kupplungsverschleiß jedoch noch moderat ist. Hierfür wurde eine Anfahrgangmatrix experimentell ermittelt. Damit kann aus der Fahrbahnsteigung und der Fahrzeugmasse der jeweilige Anfahrgang ermittelt werden.

- **Zügiges und dosiertes Schließen der Kupplung:** Wurde der richtige Anfahrgang gewählt, kann durch den richtigen Umgang mit der Kupplung der Verschleiß reduziert werden. Der Kupplungsverschleiß ist dabei maßgeblich davon abhängig, wie lange die Kupplungsscheiben mit einem Differenzmoment beaufschlagt werden. Der Kupplungsverschleiß ist minimal, wenn die Kupplung sehr schnell geschlossen wird. Jedoch treten dabei hohe Drehmomente auf, die den Antriebsstrang belasten. Daher muss ein Kompromiss zwischen Kupplungsverschleiß und Antriebstrangbelastung gefunden werden. Experimentell konnte hier ein Zeitschwellwert ermittelt werden, der für einen geringen Kupplungsverschleiß nicht unterschritten werden sollte.
- **Niedrige Motordrehzahl:** In der Literatur und Fahrerausbildung wird – im Gegensatz zum Pkw - empfohlen, während des Anfahrvorgangs das Fahrpedal nicht zu betätigen. Dies ermöglicht es der elektronischen Motorregelung eine niedrige Drehzahl einzuregeln, ohne den Motor abzuwürgen. Durch die geringere Differenzdrehzahl der Kupplungsscheiben wird der Verschleiß reduziert. Fahrversuche konnten zwar diesen Zusammenhang bestätigen, jedoch sind die Auswirkungen auf den Verschleiß deutlich geringen als bei einem falsch gewählten Anfahrgang oder bei zu langsamem Schließen der Kupplung.

Wird bei den oben genannten Punkten ein Fahrfehler erkannt, so wird er nach der obigen Aufzählungsreihenfolge priorisiert und nur der relevante Fahrfehler ausgegeben.

Gegenüber den verschleißarmen Anfahrweisen kann es in speziellen Fällen zu Ausnahmen kommen:

- **Anfahren auf lockerem Untergrund**: Befindet sich das Fahrzeug auf lockerem Untergrund, kann es sinnvoll sein, einen höheren Anfahrgang zu wählen, um den Kraftschluss zum Untergrund besser dosieren zu können. Die Situationserkennung wertet dazu die Eingriffe der Traktionshilfe und den Einsatz der Differentialsperre aus, um diesen Ausnahmefall zu erkennen.
- **Abwürgen des Motors**: Wurde der Motor im vorangegangenen Anfahrvorgang abgewürgt, so kann von einer schwierigen Anfahrsituation (z. B. Offroadeinsatz) ausgegangen werden und ein zusätzlicher Fahrhinweis wäre in einer solchen Situation entweder fehlerhaft oder würde die Ablenkung erhöhen.

Demgegenüber ist jedoch eine Vielzahl an Sonderfällen denkbar, in denen eine spezielle Anfahrprozedur angepasst ist. Um Fehldetektionen zu vermeiden, wird vor Ausgabe einer Fahrempfehlung stets geprüft, ob der Kupplungsverschleiß während des Anfahrvorgangs signifikant angestiegen ist. Als Maß für den Kupplungsverschleiß wird dazu die Kupplungsarbeit herangezogen, die integrativ über die Differenzdrehzahl und dem Differenzmoment der Kupplungsscheiben ermittelt wird. Nur wenn die Kupplungsenergie einen Schwellwert überschreitet, ist von einem verschleißerhöhenden Anfahrvorgang auszugehen.

Neben dem Anfahrvorgang ist bei Handschaltfahrzeugen das Ausnutzen des optimalen Drehzahlbereichs für eine kraftstoffeffiziente Fahrweise notwendig. Je nach Betriebspunkt

stellt der Motor die Leistung mit unterschiedlichem Wirkungsgrad zur Verfügung. Nach Abbildung 40 ist dabei im Allgemeinen der Verbrennungsprozess bei hohen Drehmomenten aber niedrigen Drehzahlen optimal.

Ein niedriger Drehzahlbereich kann jedoch nur bei quasi-stationären Bedingungen gefordert werden. Bei Topografieänderungen kann es gegebenenfalls sinnvoll sein, frühzeitig einen niedrigeren Gang zu wählen, um Leistungsreserven vorzuhalten oder in Gefälle die Wirkung der verschleißfreien Bremsen zu unterstützen.

Daher wird zunächst ermittelt, ob das Fahrzeug mit einer annäherungsweisen konstanten Geschwindigkeit bewegt wird und sich die Leistungsanforderung in einem moderaten Bereich befindet.

Während solcher Konstantfahrphasen wird die aktuelle Motorleistung bestimmt und für alle realisierbaren Gangstufen die sich einstellenden Motordrehzahlen und Drehmomente berechnet. Mittels eines vereinfachten Motorkennfelds wird für jede Gangstufe der spezifische Kraftstoffverbrauch ermittelt. Weicht der minimale spezifische Kraftstoffverbrauch signifikant vom Kraftstoffverbrauch im aktuellen Gang ab, wird der verbrauchsgünstigere Gang empfohlen.

III.7 AP7 Aufbau Demonstrator

Der Aufbau des Demonstrators wurde abgeschlossen. In dem zur Verfügung stehenden Versuchsträger (Abbildung 41) wurden die notwendigen Steuergeräte zur prototypischen Funktionsdarstellung und zur Ermittlung der vorausliegenden Streckeneigenschaften verbaut.



Abbildung 41: Für das Projekt Virtueller Fahrtrainer eingesetzter Sattelzug

Das zur Meldungsübermittlung vorgesehene Tertiärdisplay wurde ins Fahrzeug integriert und an den Steuergeräteverbund angeschlossen (Abbildung 42).



Abbildung 42: Ansicht des Cockpits aus Fahrersicht. Die Fahrhinweise des Virtuellen Fahrtrainers werden über das im Sichtfeld positionierte Tertiärdisplay optisch und akustisch ausgegeben.

Für die Datenaufzeichnung dient ein PC-basiertes Messaufzeichnungssystem das mit den Fahrzeugdatenbussen gekoppelt ist. Eine hochauflösende Kamera zeichnet zeitsynchron aus Fahrerperspektive das Verkehrsgeschehen auf und ermöglicht bei der Auswertung eine visuelle Interpretation des Fahrzeugumfelds. Neben dem im Fahrzeug standardmäßig vorliegenden Kraftstoffverbrauchssignal wurde eine hochgenaue Kraftstoffverbrauchsmessanlage verbaut, um eine Auswertung des situativen Einsparpotentials vornehmen zu können.

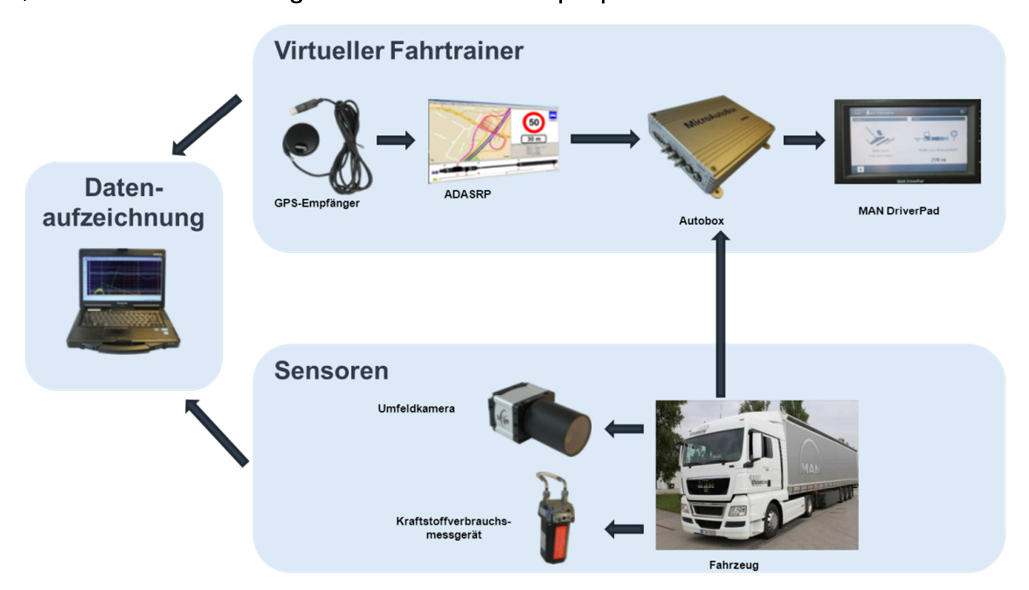


Abbildung 43: Messaufbau

III.8 AP8 Funktionsvalidierung und Optimierung

Die Funktionen zur Fahrfehler- und Situationserkennung wurden entwicklungsbegleitend durch Expertentests abgesichert. Um die Funktionsänderungen möglichst reproduzierbar testen zu können, wurde eine Referenzstrecke mit einer Streckenlänge von 95 km definiert

(Abbildung 44), die sich aus einem topografisch anspruchsvollen Überlandstraßenanteil und einem Autobahnabschnitt zusammensetzt.

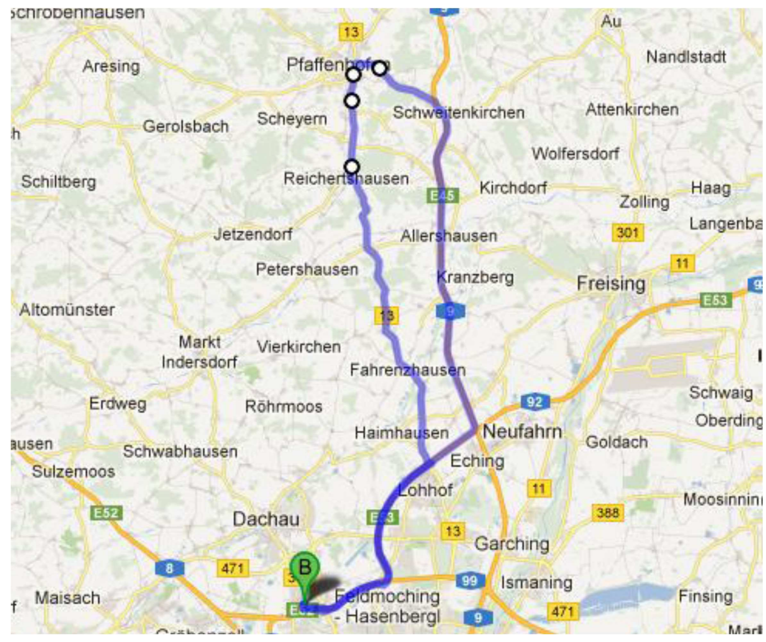


Abbildung 44: Überblick über die Referenzstrecke [Goo13]

Vor allem bei den vorausschauenden Fahrhinweisen ist eine akzeptanzangepasste Parametrierung der Mindestgeschwindigkeit von großer Bedeutung. In umfangreichen Versuchen wurde die Referenzstrecke von verschiedenen Experten befahren und iterativ ein Kompromiss zwischen möglichst hoher Kraftstoffeinsparung und geringem Zeitverlust gefunden.

Beispielhaft sind in Abbildung 45 die Situationshäufigkeit und Rolllängen eines Fahrers bei vorausschauenden Fahrhinweisen aufgetragen. Insgesamt wurden 19 vorausschauende Fahrhinweise ausgegeben, was zu einer Rolllänge von 10,6 km führte. Dabei hatten Geschwindigkeitsbegrenzungen mit 6,6 km Rolllänge den größten Anteil.

III.9 AP9 Erprobung in Fahrten mit Probanden

Mit der abschließenden Erprobung mit Probanden im Realverkehr wurde untersucht, wie sich die Systemauslegung des Virtuellen Fahrtrainers unter realen Bedingungen auf den Kraftstoffverbrauch und die Akzeptanz auswirkt.

III.9.1 Versuchsstrecke

Da sich die Referenzstrecke der Funktionsvalidierung und -optimierung bewährt hat, wurde diese weitestgehend für den Realversuch übernommen (Abbildung 46). Veränderungen ergaben sich in erster Linie aufgrund von logistischen Überlegungen. Um zwischen den Versuchsfahrten Befragungen durchführen zu können, wurde als Startpunkt der Versuchsstrecke das Industriegebiet Eching-Ost ausgewählt. Da die Anfahrt zu diesem Startpunkt von der Technischen Universität München kürzer ist als vom MAN-Werksgelände in Karlsfeld, wurde ein Parkplatz der TUM zum Ausgangs- und Endpunkt der Versuche gemacht. Die Fahrt vom Ausgangspunkt zum Startpunkt konnte somit als Eingewöhnungsfahrt genutzt werden. Die eigentliche Versuchstrecke hatte damit eine Länge von 66 km.



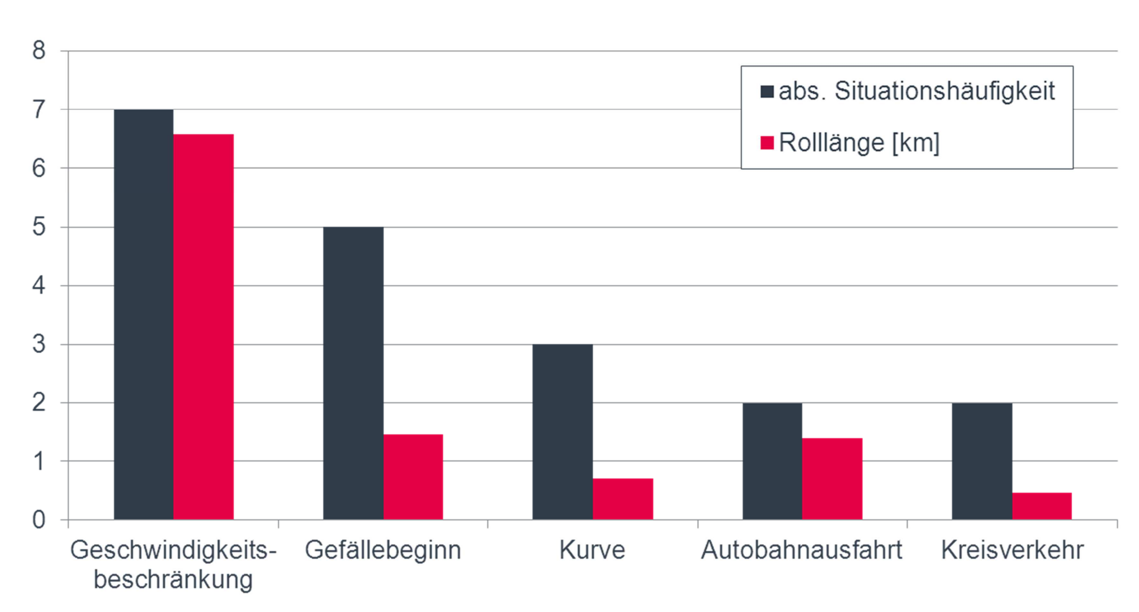


Abbildung 45: Häufigkeit vorausschauender Fahrhinweise und die daraus resultierende Rolllänge.

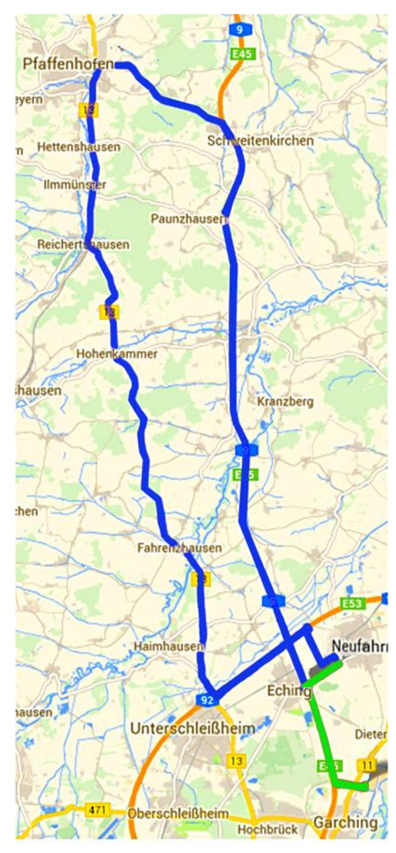


Abbildung 46: Versuchstrecke (blau) und Eingewöhnungsstrecke (grün) [Goo13]

Die Versuchsstecke wurde in einzelne Abschnitte eingeteilt, um eine Analyse des Virtuellen Fahrtrainers auf verschiedenen Straßenkategorien vorzunehmen (Tabelle 4).

Der Anteil der Fahrstrecke beträgt innerorts 12 Prozent. Die Streckenanteile auf Autobahnen und Überlandstraßen sind mit etwa 40 Prozent ausgeglichen. Lichtsignalanlagen werden

einer extra Kategorie zugeordnet. Dabei wird der Beginn des Abschnittes vor der Sichtlinie der Lichtsignalanlage gewählt, das Ende des Abschnitts wird an einen Streckenpunkt gelegt, bei dem nach einem Halt an der Lichtsignalanlage wieder die typische Reisegeschwindigkeit auf diesem Streckenabschnitt erreicht werden kann. Ebenfalls werden Autobahnauffahrten separat erfasst, da diese keiner speziellen Straßenkategorie zugeordnet werden können.

Tabelle 4: Streckenanteile unterschiedlicher Straßenkategorien

Straßenkategorie	**Anzahl**	**Strecken-länge [km]**	**Strecken-anteil [%]**
Innerorts	7	8,9	14
Überland	7	26,2	40
Autobahn	2	26,0	39
Lichtsignalanlagen	3	3,2	5
Autobahnauffahrt	2	1,7	3
Versuchsstrecke		66,1	100

III.9.2 Versuchsdesign

Obwohl im Fahrsimulatorversuch die Wirksamkeit des Virtuellen Fahrtrainers qualitativ nachgewiesen werden konnte (Abschnitt III.5.7), ist unklar, inwieweit sich die Ergebnisse quantitativ auf den Einsatz im realen Straßenverkehr übertragen lassen. Die zentrale Versuchshypothese ist daher analog zu Hypothese 2 des Fahrsimulatorversuchs formuliert als:

- **Wirksamkeit des Systems**:

  Bei Verwendung des Virtuellen Fahrtrainers stellt sich eine effizientere Fahrweise ein, als ohne System (ohne die Fahrtzeit unverhältnismäßig zu erhöhen).

  Unabhängige Variable: Systemeinsatz.

Im Vergleich zu einer Fahrsimulatoruntersuchung ist ein Realversuch im Allgemeinen wesentlich aufwendiger und zeitintensiver. Für den Versuch galt es daher unter vertretbarem Aufwand den besten Kompromiss zwischen den Faktoren Streckenlänge und Anzahl der Fahrten je Versuchsdurchlauf abzuwägen. Dabei sind die folgenden Abhängigkeiten zu beachten. Die Streckenlänge beeinflusst die Dauer einer Fahrt und damit die Zeit, die die Fahrer haben, ein Systemverständnis aufzubauen. Ist diese Zeitspanne nicht ausreichend, so ist davon auszugehen, dass der Effekt des Systemeinsatz gering ausfällt. Die Anzahl der Fahrten je Versuchsdurchlauf bestimmt wiederum, wie viele unabhängige Variablen bei einem Design mit Messwiederholung untersucht werden können. Wird nur die unabhängige Variable Systemeinsatz beleuchtet, sind mindestens zwei Fahrten notwendig.

Vorabtests haben gezeigt, dass eine Kürzung der Versuchsstrecke aus Abbildung 46 zu einer unverhältnismäßigen Reduktion von relevanten Szenarien führen würde. Für zwei Fahrten inklusive Eingewöhnungsfahrt, Befragungen sowie Wege zum und vom Versuchsfahrzeug konnten folglich 4,5 bis 5 Stunden kalkuliert werden. Diese Zeitspanne erlaubt es gerade, zwei Versuchsdurchläufe pro Tag zu absolvieren. Eine weitere, sprich dritte Fahrt pro Versuch hätte dazu geführt, dass lediglich ein Versuchsdurchlauf pro Tag möglich ist und sich der Versuchszeitraum verdoppelt. Daher wurde auf die Untersuchung von weiteren unabhängigen Variable im Realversuch verzichtet.



Innergruppenvergleiche benötigen zum statistischen Nachweis von Mittelwertsunterschieden einen kleineren Stichprobenumfang als Zwischengruppenvergleiche. Diesem im Sinne der Testökonomie entscheidenden Vorteil steht eine wesentlicher Nachteil gegenüber: Aufgrund der Messwiederholung kann es zu den verschiedensten Reihenfolgeeffekten kommen.

Im Unterschied zum Fahrsimulatorversuch können im Realversuch die Segmente der Versuchsstrecke in der Reihenfolge nicht beliebig variiert werden. Daher besteht die Gefahr, dass die Teilnehmer sich die Strecke auf der ersten Fahrt einprägen und dieses Wissen auf der zweiten Fahrt abrufen. Ist die erste Fahrt die Referenz- bzw. Vergleichsfahrt, kann dieser Lerneffekt die zweite Fahrt mit Fahrtrainer beeinflussen. Eine Reduktion des Verbrauchs kann nunmehr nicht eindeutig dem System zugeschrieben werden. Um einen derartigen Lerneffekt auszugleichen, wird ein gekreuztes und balanciertes Versuchsdesign ausgewählt, so dass sich zwei Versuchsgruppen mit Messwiederholung ergeben (Abbildung 47). Gruppe 1 befährt die Versuchstrecke zunächst ohne Fahrhinweise des Virtuellen Fahrtrainers. Erst auf der zweiten Fahrt wird der Fahrtrainer aktiviert (Systemfahrt). Gruppe 2 wird gleich auf der ersten Fahrt vom System assistiert, während der zweite Lauf als Vergleichsfahrt dient.

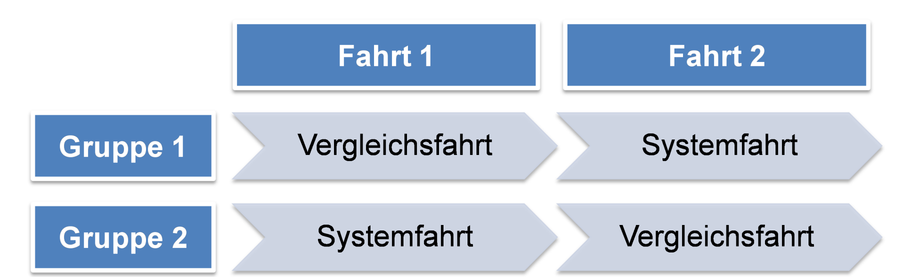


Abbildung 47: Aufteilung der Probanden in zwei Gruppen zum Ausgleich von Reihenfolgeeffekte. Gruppe 1 fährt zunächst ohne System, dann mit System. Bei Gruppe 2 ist die Reihenfolge umgekehrt.

Zwar ist durch das gekreuzte und balancierte Versuchsdesign eine Kontrollierbarkeit des Lerneffektes möglich, jedoch lässt dieser Versuchsplan einen weiteren Reihenfolgeeffekt für die Gruppe 2 erwarten. Es muss davon ausgegangen werden, dass die zweite Fahrt von einer Konfrontation des Fahrers mit dem Virtuellen Fahrtrainer auf der ersten Fahrt beeinflusst sein wird, auch wenn die Teilnehmer vor der Fahrt 2 nicht explizit angewiesen werden effizient zu fahren. Alleine aus der Konfrontation mit dem System ziehen die Teilnehmer den Schluss, dass im Versuch das Verbrauchsverhalten untersucht wird und geben sich deshalb auf der Fahrt 2 besonders Mühe (sog. Demand Characterisics). Diesem Reihenfolgeeffekt wird versucht mit einer experimentellen Täuschung zu begegnen.

Zu diesem Zweck werden die Probanden bereits während der Einweisung darüber unterrichtet, dass im Versuch zwei Fahrten absolviert werden, die allerdings keinen inhaltlichen Zusammenhang haben. Vor der Vergleichsfahrt beider Gruppen wird dann eine Befragung durchgeführt, die sich mit dem Wertigkeitsempfinden von Lenkrad und Armaturenkomponeten befasst (Optik und Haptik). Zudem werden auf der Vergleichsfahrt Fragen zur Fahrzeugakustik gestellt. Diese Täuschung soll dazu beitragen, den Effekt der Demand Characteristics zu reduzieren.

III.9.3 Versuchsdurchführung

Die Probandengruppe setzt sich aus 22 Berufskraftfahrern zwischen 31 und 58 Jahren zusammen ($\bar{x} = 45$). Es nahm eine weibliche Probandin teil. Für den Versuch wurden nur erfahrene Lkw-Fahrer ausgewählt. Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung der Teilnehmer beträgt 41.150 km. Im Mittel wiesen die Fahrer aus insgesamt 645.700 km mit dem Lastkraftwagen zurückgelegt zu haben.

Für die Betreuung der Versuche werden immer zwei Personen eingesetzt: Ein Versuchsleiter und ein Versuchstechniker. Der Versuchsleiter ist für die Betreuung des Probanden zuständig. Er führt die Befragungen und beantwortet Rückfragen. Der Versuchstechniker bedient die Messsysteme, protokolliert Vorkommnisse und assistiert den Versuchsleiter unter Zuhilfenahme eines Ablaufplans.

Während der Versuchstechniker die Messtechnik im Lkw vorbereitet, werden die Teilnehmer durch den Versuchsleiter am Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik begrüßt. Dort unterzeichneten die Probanden die Einwilligungserklärung und absolvierten eine demographische Befragung. Im Anschluss werden die Versuchsteilnehmer mit dem Fahrzeug am Ausgangspunkt der Versuche vertraut gemacht (Parkplatz der Technischen Universität München) und insbesondere die Bedienung der serienmäßigen Assistenzfunktionen erklärt. Daraufhin folgt eine etwa 10-minütige Eingewöhnungsfahrt zum Startpunkt des Versuches (Abbildung 46). Auf der Eingewöhnungsfahrt werden die Teilnehmer aufgefordert Tempomat, ACC, Limiter und Retarder einzusetzen, um die Bedienung zu üben.

Nach der Eingewöhnungsfahrt wird der Versuch je nach Gruppe mit den zwei Fahrten durchgeführt. Vor und zwischen den Fahrten werden die Fahrer am Startpunkt der Versuchsstrecke befragt. Neben Täuschungsbefragungen zur Akustik (Motoren- und Windgeräuschen, vgl. III.9.2) auf den Vergleichsfahrten, werden die Teilnehmer während der Systemfahrt zu Aspekten der ViFa-Anweisungen befragt. Die zweite Versuchsfahrt endet nicht am Startpunkt sondern am Ausgangspunkt auf dem Parkplatz der TUM. Dort findet eine finale Befragung statt, bevor die Probanden eine Aufwandsentschädigung erhalten und verabschiedet werden.

III.9.4 Einflüsse auf die Fahrweise

Bei der Systemfahrt trat der Fahrhinweis zum Ausrollen vor Infrastruktur im Mittel zwischen 8 und 10 Mal und damit am häufigsten auf (Abbildung 48). Ebenfalls traten die Fahrhinweise zum Ausrollen vor Gefälle, zum zügigen Beschleunigen und der Verwendung von ACC und Limiter regelmäßig auf. Die übrigen Anweisungen wurden vom Virtuellen Fahrtrainers nur vereinzelt ausgegeben. Entweder wurden also die entsprechenden Fahrsituationen von den Fahrern fehlerfrei bewältigt oder die Situationen traten selten auf. Gerade die geringe Häufigkeit des Fahrhinweises zur Anpassung der Reisegeschwindigkeit, der bei einer dauerhaften Fahrgeschwindigkeit über 85 km/h ausgelöst wird, deutet dies darauf hin, dass die Probanden auf den Autobahnabschnitten unter den Versuchsbedingungen bemüht zurückhaltend fuhren.

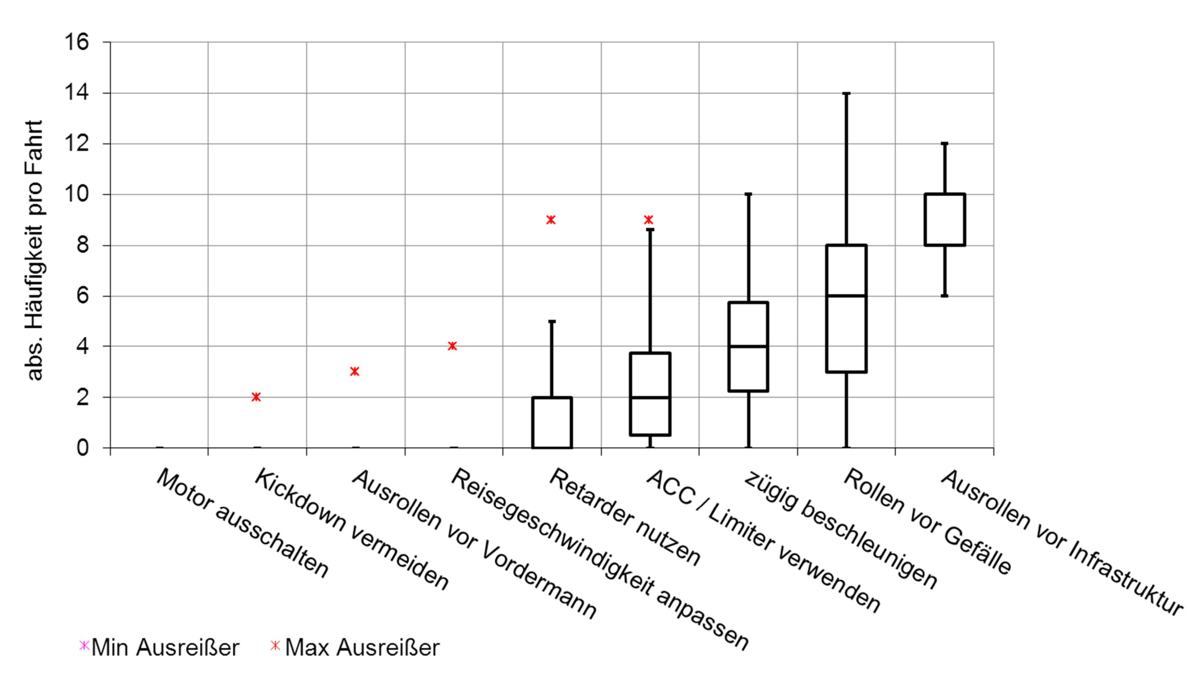


Abbildung 48: Absolute Häufigkeiten der Fahrhinweise während der Systemfahrt

Für die Bewertung der vorausschauenden Fahrhinweise ist vor allem die Rolllänge vor den einzelnen vorausliegenden Fahrsituationen von Bedeutung. Während dieser Phasen rollt das Fahrzeug im Schubbetrieb, ohne dass Kraftstoff verbraucht wird.

Für die Probandenfahrten betrug die mittlere potentielle Rolllänge vor Infrastrukturelementen 5.700 m, für topografiebedinge Rollphasen 2.800 m (Abbildung 49). Ein Fahrer, der alle Fahrhinweise exakt befolgt, könnte demnach diese Rolllängen erzielen. Bei den Vergleichsfahrten wurde diese Rolllänge vor Infrastrukturelementen von den Probanden zu 56 Prozent erreicht, mit Fahrhinweisen des Virtuellen Fahrtrainers stieg sie auf 83 Prozent. Besonders bei der Topografie zeigt sich, dass die Fahrer ohne Fahrhinweise mit 34 Prozent nur einen geringen Anteil der potentiellen Rolllänge ausnutzten und durch die Fahrhinweise eine Steigerung auf 79 Prozent erzielt wurde.

Für die Auswertung der Kraftstoffverbräuche ist es notwendig, Verkehrsstörungen von der Auswertung auszuschließen. Beispielsweise würden einzelne Stausituationen bei dem versuchsbedingt geringen Fahrumfang eine Versuchsgruppe überproportional belasten. Daher wurden die Notizen der Versuchsleiter und das während des Versuchs aufgenommene Video analysiert. War zu erkennen, dass der Proband aufgrund eines nicht typischen Ereignisses (z. B. Fahrradfahrer, landwirtschaftliches Fahrzeug, Wanderbausstellen, Stau) seine Geschwindigkeit anpassen musste, wurde dieser Abschnitt markiert und von der Auswertung ausgeschlossen. Ebenfalls wurden Streckenabschnitte mit Lichtsignalanlagen von der Bewertung ausgenommen.

Mit den Fahrhinweisen des Virtuellen Fahrtrainers konnten die Probanden auf Überlandstraßen mit 3,3 Prozent die höchste Kraftstoffeinsparung erzielen (Abbildung 50). Innerorts und auf Autobahnen fällt die Kraftstoffersparnis mit 0,8 Prozent beziehungsweise 1,6 Prozent geringer aus. Insgesamt ergibt sich für die Versuchstrecke eine Einsparung von 2,1 Prozent.



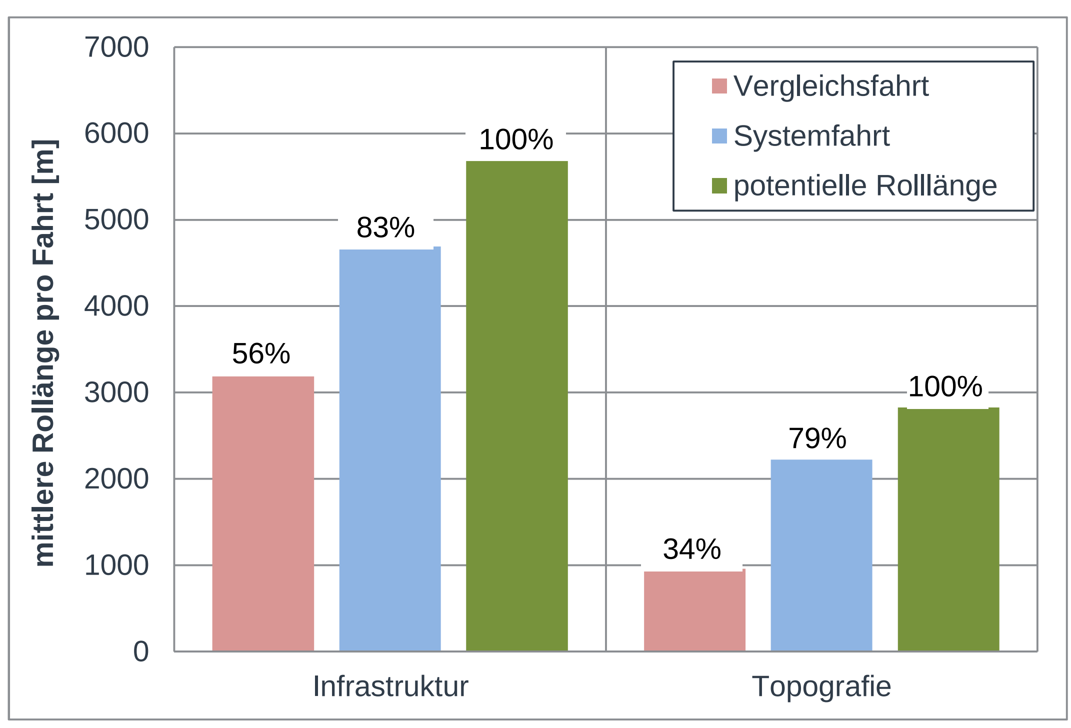


Abbildung 49: Vergleich der Rolllängen vor Infrastrukturelementen und topografisch bedingten Ausrollsituationen

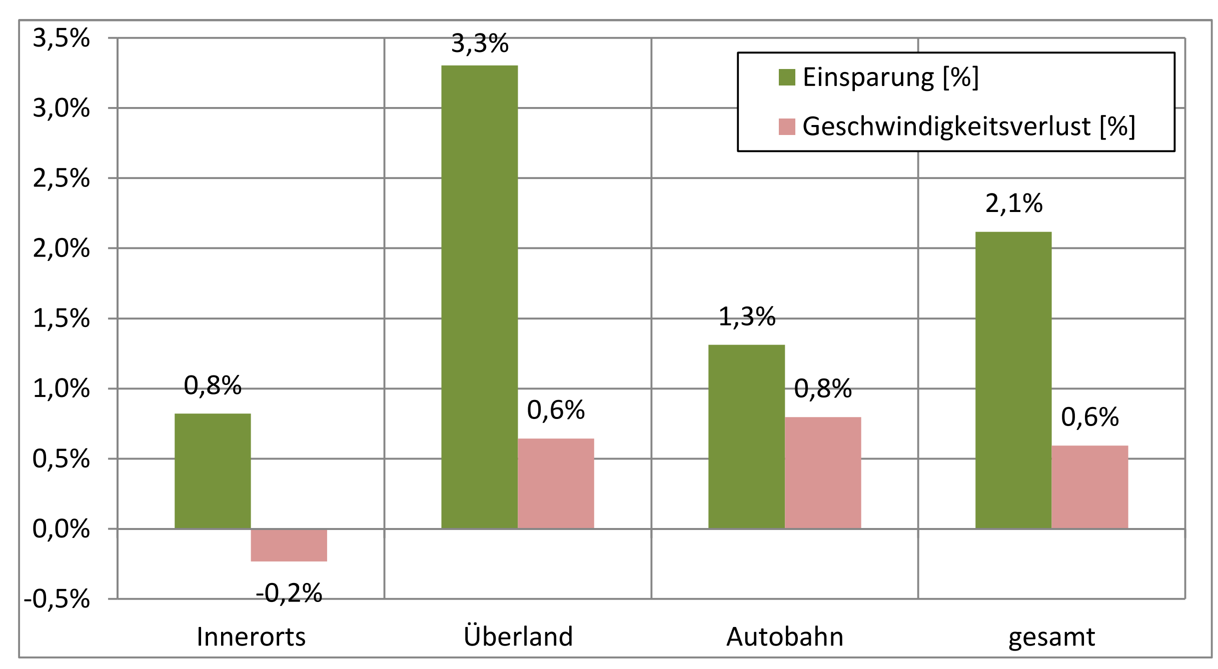


Abbildung 50: Kraftstoffverbrauchseinsparungen und Geschwindigkeitsverluste der Systemfahrt für unterschiedliche Straßenkategorien

Auch beim Geschwindigkeitsverlust zeigt sich, dass der Virtuelle Fahrtrainer seine Stärken auf Überlandstraßen ausspielen kann. Mit 0,6 Prozent ergibt sich im Vergleich zur Autobahn ein etwas geringerer Geschwindigkeitsverlust, jedoch bei deutlich höherem Einsparpotential. Innerorts ergibt sich zwischen Vergleichsfahrt und Systemfahrt nur ein geringer Unterschied.

III.9.5 Einfluss auf das Akzeptanzempfinden

Sowohl in der Fahrsimulatoruntersuchung (Unterkapitel III.5) als auch im Realversuch werden die Teilnehmer zum Akzeptanzempfinden gegenüber dem Virtuellen Fahrtrainer befragt. Methodisch lassen sich die Befragungen in zwei Kategorien einteilen:

1. Akzeptanzmessung nach VAN DER LAAN et al. [Laa97] und
2. explorative Befragung.

Die Akzeptanzmessung nach VAN DER LAAN wird in beiden Versuchen strikt nach den Vorgaben durchgeführt. Eine Vergleichbarkeit zwischen Fahrsimulator- und Realversuch aufgrund der Methodik sollte damit gewährleistet sein.

Die explorative Befragung weist hinsichtlich der Vergleichbarkeit zwischen beiden Studien hingegen Einschränkungen auf. Aufgrund der unterschiedlichen Versuchspläne und uneinheitlichen Forschungsfragen ergeben sich teilweise unterschiedliche Abläufe in der Durchführung. Zudem wurden nach dem Fahrsimulator- und vor dem Realversuch vereinzelt Bewertungskategorien der Skalen abgeändert. Um ein vollständiges Bild zur Nutzerakzeptanz und Bewertung des Virtuellen Fahrtrainers durch die Teilnehmer abzugeben, erscheint es trotzdem zweckmäßig die Ergebnisse vergleichend gegenüberzustellen.

III.9.5.1 Bewertung der Akzeptanz nach VAN DER LAAN et al.

Um Akzeptanzuntersuchungen auf dem Gebiet der Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystem vergleichen zu können, schlagen VAN DER LAAN et al. 1999 eine Standardmethode vor [Laa97]. Diese sieht eine Befragung von neun Item-Paaren auf einer fünfstufigen Skala vor, wobei die gleiche Befragung zweimal durchgeführt wird (Abbildung 51). Die erste Befragung erfolgt bevor die Versuchsteilnehmer Erfahrungen mit dem System sammeln konnten. Für diese Befragung wird ihnen das System lediglich beschrieben (Tabelle 5). Die Angaben der Teilnehmer stellen demnach die Einstellung gegenüber bzw. die Erwartungshaltung an ein hypothetisches System dar. Für den Realversuch wird die Systembeschreibung des Fahrsimulatorversuchs modifiziert (Tabelle 5). Die zweite Befragung mit den gleichen Items findet unmittelbar nach der Systemfahrt statt („Sie sind gerade mit dem Fahrerassistenzsystem Virtueller Fahrtrainer gefahren. Wie beurteilen Sie dieses System?“).

Die Item-Paare werden von den Versuchsteilnehmern auf einer fünfstufigen Skala bewertet. Für die Auswertung werden eine negative Konnotation des jeweiligen Item-Wortes mit −2 und eine positive mit +2 gewertet. Wie in Abbildung 51 dargestellt, werden anschließen fünf der neun Item-Paare per Mittelwertsbildung zur sog. Usefulness Scale (etwa Gebrauchstauglichkeits-Skala) und die verbleibenden vier zur Satisfying Scale (etwa Zufriedenheits-Skala) zusammengefasst [Laa97].

Die Ergebnisse der Befragung für den Fahrsimulator- und Realversuch sind in Tabelle 6 aufgeführt. In Abbildung 52 sind die Ergebnisse zudem im Vergleich mit anderen Systemen dargestellt, die ebenfalls einer Akzeptanzuntersuchung nach VAN DER LAAN et al. unterzogen wurden. Im Rahmen des Realversuchs wird der Virtuelle Fahrtrainer wesentlich besser bewertet als in der Fahrsimulatoruntersuchung. Dies trifft sowohl auf die Befragung vor als auch nach der Systemfahrt zu. Außerdem konnte das System in beiden Versuchen die Erwartungshaltung der Teilnehmer übertreffen. Für beide Skalen fällt die Beurteilung nach der Systemfahrt besser aus als vor dieser Fahrt.

Tabelle 5: Varianten der Fragestellung für die Befragung nach VAN DER LAAN vor der Systemfahrt

Fahrsimulatorversuch	Realversuch
Stellen Sie sich vor, in Ihren LKW wird ein neues Fahrerassistenzsystem eingebaut, dass Ihnen dabei helfen kann, …	
… kraftstoffsparender zu fahren. Das System gibt Ihnen dazu in bestimmten Situationen Anweisungen, …	… effizienter zu fahren. Das System zeigt Ihnen dazu in bestimmten Situationen Anweisungen auf einem Display und gibt diese per Sprachausgabe aus. Diese Anweisungen beinhalten Vorschläge, …
… wie Sie Ihre Fahrweise anpassen sollten. Geben Sie bitte an, was Sie von einem solchen System halten würden?	

U	Antworten werden zur Usefulness Scale zusammengefasst
S	Antworten werden zur Satisfying Scale zusammengefasst

U	Wirksam	O	O	O	O	O	Nutzlos
S	Angenehm	O	O	O	O	O	Unangenehm
U	Schlecht	O	O	O	O	O	Gut
S	Unaufdringlich	O	O	O	O	O	Nervig
U	Hilfreich	O	O	O	O	O	Überflüssig
S	Ärgerlich	O	O	O	O	O	Erfreulich
U	Unterstützend	O	O	O	O	O	Wertlos
S	Unerwünscht	O	O	O	O	O	Erwünscht
U	Aufmerksamkeitsst-eigernd	O	O	O	O	O	Einschläfernd

Abbildung 51: Akzeptanzbefragung nach VAN DER LAAN et al. mit neun Item-Paaren und deren Zugehörigkeit zur Usefulness und Satisfying Scale (eigene Darstellung nach [Laa97])

Tabelle 6: Ergebnisse der Akzeptanzbefragung nach VAN DER LAAN et al.

	Vor Systemfahrt		Nach Systemfahrt	
	Satisfying Scale	Usefulness Scale	Satisfying Scale	Usefulness Scale
Fahrsimulator	−0,11	0,68	0,49	0,94
Realversuch	0,75	1,02	0,89	1,22

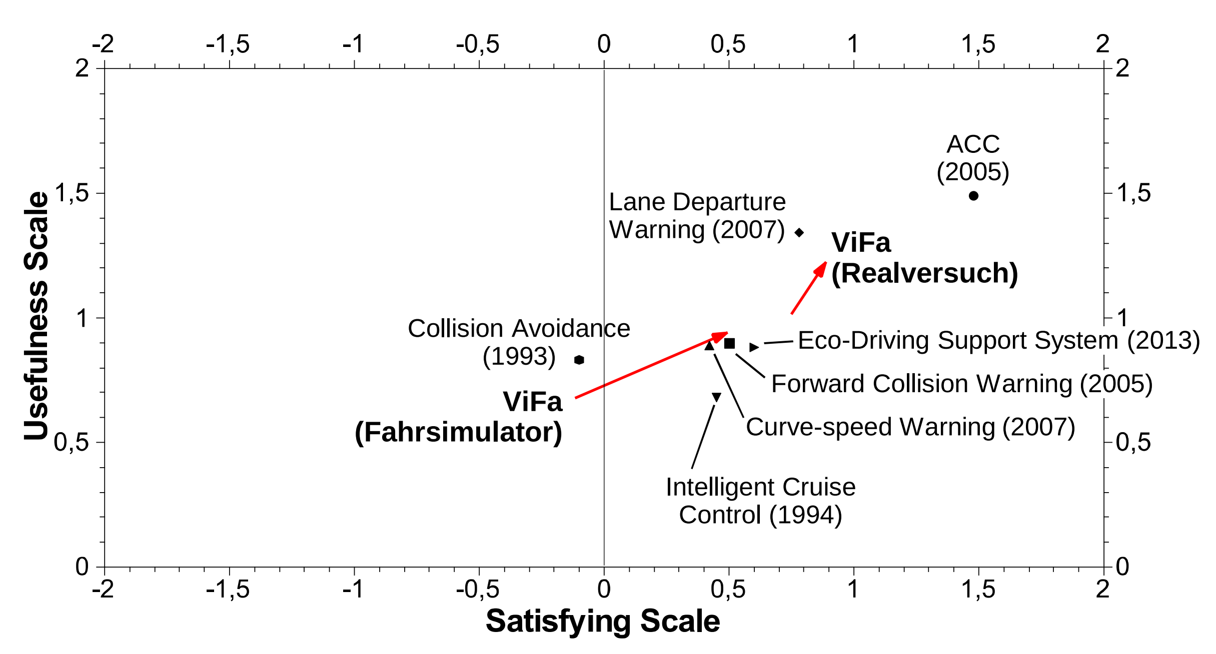


Abbildung 52: Ergebnisse der Akzeptanzbefragung nach VAN DER LAAN et al. für den Fahrsimulator- und Realversuch im Vergleich zu Systemen aus anderen Untersuchungen. Die Startpunkte der Pfeile beschreiben die Einschätzung der Versuchsteilnehmer vor der Fahrt mit dem ViFa und die Pfeilspitzen die Beurteilung des Systems nach der Fahrt. Für die Vergleichssysteme werden nur die Beurteilungen nach der Systemfahrt dargestellt (eigene Darstellung mit Daten aus [Laa97], [Say07] und [Sta13]).

Im Vergleich zu anderen Fahrzeugsystemen schneidet der Virtuelle Fahrtrainer ebenfalls gut ab. Die Bewertungen im Rahmen des Fahrsimulatorversuchs sind vergleichbar mit den Ergebnissen eines Forward-Collision-Warning-Systems [Say07], eines Curve-Speed-Warning-Systems [Say07] und eines weiteren Verbrauchsassistenzsystem (Eco-Driving-Support-System) [Sta13]. Im Realversuch übertrifft der Virtuelle Fahrtrainer dieses Ergebnis zwar, kann aber nicht ganz an die Bewertungen eines Lane-Departure-Warning-Systems [Say07] und eines ACC-Systems [Say07] heranreichen.

III.9.5.2 Bewertung der Akzeptanz mittels explorativer Befragung

Die explorative Befragung wird aus Fragebogenelementen von MOHRA konzipiert und weiterentwickelt [Moh13, S. 199–246]. Die Elemente werden teilweise angepasst, abgeändert oder um weitere Items ergänzt. Zudem werden neue Fragen erstellt.

Abbildung 53 zeigt die relativen Häufigkeiten der Nennungen eines explorativen Befragungsblocks. Der obere Balken stellt die Ergebnisse der Fahrsimulatoruntersuchung (Systemgruppe N = 20) und der untere die des Realversuchs dar (beide Gruppen N = 22). Innerhalb der Balken sind zudem die absoluten Häufigkeiten der Nennungen für die einzelnen Skalenkategorien angegeben. Dieser Befragungsblock wurde in beiden Versuchen nach der Systemfahrt unmittelbar nach der Befragung nach VAN DER LAAN et al. abgefragt. Die Befragung dieses Blocks enthält deshalb hauptsächlich Fragen zu Aspekten der operativen Ebene und der Gebrauchstauglichkeit. Da die Erinnerungen an das System noch frisch sind, ist davon auszugehen, dass die Teilnehmer detailliert Angaben machen können ob und warum das System ablenkt oder stört, warum die Informationen verständlich sind oder nicht.

■ trifft nicht zu ■ trifft eher nicht zu ■ unentschieden /weder noch ■ trifft eher zu ■ trifft zu

Rel. Häufigkeit der Nennungen je Versuch

0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%

Aussage	Fahrsimulator	Realversuch
Ich wurde während der Fahrt durch das System mehr als sonst vom Verkehrsgeschehen abgelenkt.	8, 7, 0, 4, 1	12, 2, 1, 7, 0
Ich habe mich durch das System gestört gefühlt.	10, 5, 3, 1, 1	15, 0, 4, 3, 0
Ich habe mich durch das System bevormundet gefühlt.	10, 3, 3, 3, 1	12, 3, 4, 2, 1
Es gab Situationen, in denen ich durch das System erschreckt wurde.	15, 4, 1, 0	16, 3, 3, 0
Das System hat mich gut motiviert, die Informationen umzusetzen.	2, 2, 2, 5, 9	0, 1, 4, 4, 13
Ich habe alle Informationen des Systems umgesetzt.	1, 0, 2, 10, 7	3, 2, 0, 7, 10
Ich habe immer gewusst, was die Informationen des Systems bedeuten.	0, 2, 4, 14	1, 6, 1, 3, 11
Ich habe die Meldungen immer sofort gesehen.	0, 2, 0, 2, 16	1, 6, 0, 3, 12
Es gab Situationen in denen mich das System verunsichert hat.	12, 3, 1, 2, 2	12, 2, 0, 6, 2
Ich habe immer verstanden, warum die Anweisungen zu einer effizienteren Fahrweise führen.	0, 1, 3, 16	3, 3, 3, 5, 8
Die Anweisungen des Systems zur effizienteren Fahrweise waren für mich neu/unbekannt.	7, 8, 2, 1, 2	11, 3, 0, 3, 5
Es gab Situationen, in denen ich mir weniger Informationen vom System gewünscht hätte.		10, 2, 3, 6, 1
Es gab Situationen in denen ich mir mehr Informationen vom System gewünscht hätte.	10, 3, 3, 3, 1	7, 2, 6, 2, 5

Abbildung 53: Beurteilung des Virtuellen Fahrtrainers im Fahrsimulator- und Realversuch unmittelbar nach der Systemfahrt

In beiden Versuchen überwiegen die positiven Bewertungen. 55 % der Nennungen im Realversuch (RV) im Vergleich zu 40 % im Fahrsimulatorversuch (FV) beurteilen eine Ablenkung vom Verkehrsgeschehen als „nicht zutreffend“. Anderseits ist mit knapp 32 % eine Bestätigung einer Ablenkung (Nennungen „trifft eher zu“ und „trifft zu“) ebenfalls höher als in der Fahrsimulatoruntersuchung (25 %). Bzgl. der Ablenkung gehen die Meinungen im Realversuch also weiter auseinander. 68 % (RV) bzw. 75 % (FV) der Teilnehmer fühlen sich nicht durch den ViFa gestört. Immerhin 7 der Teilnehmer beider Versuche, also etwa 17 %, geben an sich vom System bevormundet zu fühlen. Eine motivierende Wirkung wird wiederum bei den Probanden des Realversuchs umfangreicher bestätigt (77 % zu 70 % FV). Genau andersherum verhält es sich mit der Verständlichkeit der Informationen: Hier geben 90 % der Teilnehmer der Fahrsimulatorstudie an die Bedeutung der Informationen verstanden zu haben. Im Realversuch sind hingegen für 32 % der Teilnehmer die Informationen nicht nachvollziehbar. Trotzdem geben ebenfalls 32 % der Teilnehmer des Realversuchs an, dass es Situationen gab, in denen sie sich tendenziell weniger Informationen vom, System gewünscht hätten. Hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit der Meldung hat der Virtuelle Fahrtrainer im Fahrsimulator ebenfalls bessere Bewertungen erhalten (90 % FV zu 68 % RV).

In Abbildung 54 sind die Resultate einer weiteren explorativen Befragung dargestellt. Diese Befragung stellt die abschließende Bewertung des Systems durch die Teilnehmer dar. Sie wurde im Fahrsimulatorversuch von der Systemgruppe nach der vierten Fahrt durchgeführt und im Realversuch in beiden Gruppen jeweils nach der Systemfahrt (entsprechend je nach Gruppe entweder nach Fahrt 1 oder nach Fahrt 2). Im Unterschied zu explorativen Befragung unmittelbar nach der Systemfahrt holt die abschließende Befragung ein allgemeineres Urteil zum Virtuellen Fahrtrainer ein.

Auch bei den Ergebnissen der abschließenden Befragung überwiegen die Nennungen der positiv zu wertenden Skalenkategorien. Als wenig oder nicht sinnvoll erachten 3 von insgesamt 42 Teilnehmern oder ca. 7 % das System bzw. Handlungsanweisung während der Fahrt. Die 22 Probanden des Realversuchs sind allesamt der Meinung, dass der Virtuelle Fahrtrainer und Handlungsanweisungen während der Fahrt eher sinnvoll oder sinnvoll sind. Alle negativen Beurteilungen stammen also aus der Fahrsimulatorstudie. Die vierte Aussage „Das System wirkt wie ein Oberlehrer“ wurde von 15 Probanden (68 %) völlig negiert, während sie im Fahrsimulator von 5 Probanden (25 %) völlig und von weiteren 5 (25 %) eher abgelehnt wurde. Hier hinterließ der ViFa im Realversuch einen weniger belehrenden Eindruck. Dem gegenübersteht die Beurteilung der Aussage „Es war mir stets ersichtlich, dass ich, durch Ausführen der jeweiligen Handlungsanweisung, Kraftstoff sparen kann“. Im Realversuch lehnten diese Aussage zwei Probanden (9 %) völlig und fünf (22 %) teilweise ab. Weitere drei Teilnehmer (13 %) nahmen eine neutrale Haltung ein. Die Teilnehmer des Fahrsimulatorversuchs konnten das Einsparpotential aufgrund der Anweisungen besser nachvollziehen. 17 Probanden (85 %) stimmten dieser Aussage teilweise oder voll zu. Ungeachtet der Erkenntnis, dass die Ausführung der Handlungsanweisungen Kraftstoffersparnisse zur Folge haben, wurde zuvor der fünften Aussage, das System könne zur Kraftstoffeinsparung beitragen, weniger stark zugestimmt. Insgesamt 34 Fahrer (81 %) sind der Ansicht, dass ein langfristiger Einsatz des Systems zu einer Änderung der Fahrweise führen würde. Die Nutzung des Systems hat der Mehrheit der Probanden zumindest teilweise Spaß gemacht hat (35 bzw. 81 %). Auch hier viel die Zustimmung im Realversuch stärker aus. Drei Teilnehmern der Fahrsimulatoruntersuchung hat die Nutzung es Virtuellen Fahrtrainers keinen Spaß gemacht.

■ trifft nicht zu ■ trifft eher nicht zu ■ weder noch ■ trifft eher zu ■ trifft zu

Rel. Häufigkeit der Nennungen je Versuch

0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%

Aussage	Fahrsimulator	Realversuch
Ich halte das System für sinnvoll.	1 2 2 7 8	0 5 17
Ich halte Handlungsanweisungen während der Fahrt für sinnvoll.	1 2 2 7 8	0 5 17
Das System ist meiner Meinung nach ohne Einarbeitung für jeden sofort verständlich.	1 1 0 5 13	0 3 4 3 12
Das System wirkt auf mich wie ein Oberlehrer.	5 5 5 2 3	15 3 2 1 1
Ich denke, das System kann mir helfen, Kraftstoff zu sparen.	0 1 2 6 11	0 1 3 18
Das System eignet sich besser als ein Fahrertraining, den Kraftstoffverbrauch zu senken.	2 1 7 7 3	2 2 10 2 6
Ich werde langfristig versuchen, alle Handlungsanweisungen des Systems umzusetzen.	2 1 2 13 1	0 1 1 5 15
Durch den langfristigen Einsatz des Systems wird sich meine Fahrweise ändern.	2 2 0 8 8	1 2 1 2 16
Ich hatte immer genug Zeit, die Handlungsanweisungen des Systems zu lesen.	0 3 17	2 3 2 6 9
Ich habe bei allen Handlungsanweisungen sofort gewusst, was von mir verlangt wird.	0 2 18	0 3 0 19
Es war mir stets ersichtlich, dass ich, durch Ausführen der jeweiligen Handlungsanweisung, Kraftstoff sparen kann.	0 3 0 3 14	2 5 3 4 8
Das System wird sich meiner Meinung nach durchsetzen können.	2 1 5 5 7	0 1 6 15
Ich hatte den Eindruck, dass das System meinen Fahrstil positiv beeinflusst.	1 3 3 7 6	0 3 3 16
Durch das System fühlte ich mich zu unnötig häufigen Reaktionen veranlasst und fuhr dadurch unruhiger.	8 5 3 2 1	14 4 2 1 1
Die Nutzung des Systems hat mir Spaß gemacht.	2 1 2 5 10	0 2 2 18
Der Einsatz des Systems würde dazu führen, dass ich meine Liefertermine nicht einhalten kann.		15 5 1 0 1

Fahrsimulator

Realversuch

Realversuch

Abbildung 54: Abschließende Beurteilung des Virtuellen Fahrtrainers durch die Versuchsteilnehmer des Fahrsimulator- und Realversuchs

III.9.5.3 Diskussion der Ergebnisse zur Akzeptanzbefragung

Auch wenn die Ergebnisse der explorativen und der Befragung nach VAN DER LAAN et al. keine Aussagen über die langfristige Akzeptanz erlauben, sind die Resultate für eine kurz- bis mittelfristige Nutzungsbereitschaft zunächst positiv zu bewerten. Die Akzeptanzbefragung nach VAN DER LAAN et al. zeigt sowohl für den Fahrsimulator- als auch den Realversuch, dass die Erwartungen an ein hypothetisches Verbrauchsassistenzsystem vom Virtuellen Fahrtrainer übertroffen wurden. Zudem kann der Prototyp des ViFa ähnlich gute Skalenwerte wie andere, aus der Forschung bekannte Systeme erzielen.

Relativierend sei an dieser Stelle erwähnt, dass eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen von SAYER et al. nur bedingt möglich ist. Diese Systeme wurden von den Teilnehmern nicht nur kurzfristig in einem Experiment sondern vielmehr über mehrere Wochen im Alltag getestet [Say07]. Die Studie von STAUBACH et al. wurde hingegen ebenfalls mithilfe eines dynamischen Fahrsimulators durchgeführt [Sta13]. Die Ergebnisse sind daher trotz methodischer Abweichungen aufgrund der Art der Studie Vergleichbar mit denen der im Rahmen des Projektes „Virtueller Fahrtrainer“ durchgeführten Fahrsimulatoruntersuchung.

Die Gegenüberstellung der Befragungsergebnisse zeigt auch, dass die subjektive Bewertung des Virtuellen Fahrtrainers durch die Teilnehmer im Realversuch tendenzielle besser ausfällt. Dies gilt sowohl für die Befragung nach VAN DER LAAN et al. (Abbildung 52) als auch für die explorative Abschlussbefragung (Abbildung 54). Neben den bereits erwähnten Abweichung in der Methodik der explorativen Befragung, erscheinen für diese Unterschiede folgende Erklärungsansätze plausible:

1. Das „Begeisterungspotential“ des Virtuellen Fahrtrainers ist im Realverkehr größer als in der virtuellen, „gespielten“ Welt des Fahrsimulators. Es muss davon ausgegangen werden, dass den Probanden bewusst ist, dass im Fahrsimulator Assistenzsysteme dargestellt werden können, die in der Realität in dieser Form noch nicht funktionsfähig sind. Entsprechend größer ist die Begeisterung, wenn ein neuartiges System im Realverkehr getestet wird.

2. Unterschiede in der Stichprobe bzgl. der Einstellung zu Fahrerassistenzsystemen oder zu einer kraftstoffeffizienten Fahrweise.

3. Stärkere Versuchsleitereffekte im Realversuch, da der Versuchsleiter präsenter war (begleitend im Fahrzeug) und die Teilnehmer zudem von einer weiteren Person, dem Technikleiter, beobachtet wurden.

Die These eines größeren Begeisterungspotenzials im Realversuch erhält vor allem Unterstützung aus den Ergebnissen der Befragung nach VAN DER LAAN et al. (Abbildung 52). Während im Fahrsimulatorversuch die relative Verbesserung für die Satisfying Scale stärker als für die Usefulness Scale ausfällt („Ach, das System ist doch gar nicht so nervig!“), verhält es sich im Realversuch umgedreht. Dort ist die Steigerung auf der Usefulness Scale umfangreicher. Aspekte der Wirksamkeit bzw. Nützlichkeit haben hier also stärker bzw. „mehr“ beeindruckt als Aspekte der Satisfying Scale.

Dies kann aber nicht erklären, weshalb bereits die Bewertung des hypothetischen Systems im Realversuch besser ausfiel. Neben Versuchsleitereffekten könnten für diesen Umstand Unterschiede in der Einstellung ursächlich sein.

Wie häufig achten Sie während der Fahrt auf den Verbrauch?

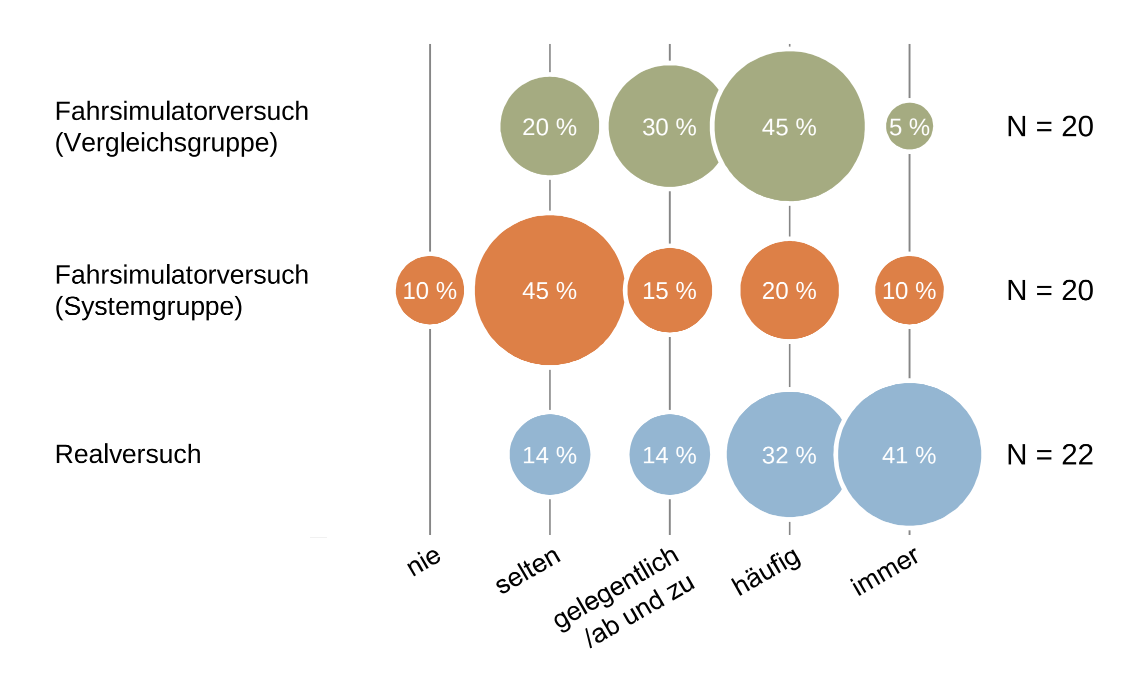


Abbildung 55: Relative Häufigkeit der Nennungen auf die Frage, wie häufig die Teilnehmer während Fahrten auf den Verbrauch achten

Wie häufig achten Sie während der Fahrt auf den Verschleiß?

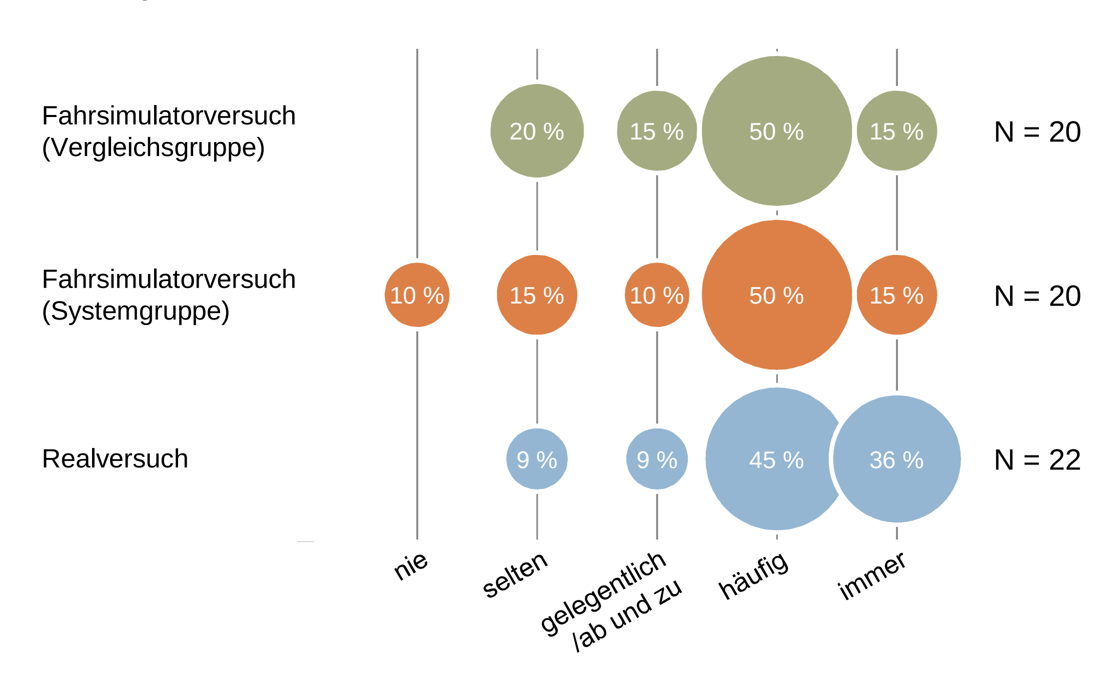


Abbildung 56: Relative Häufigkeit der Nennungen auf die Frage, wie häufig die Teilnehmer während Fahrten auf den Verschleiß achten

Wie häufig achten Sie während der Fahrt auf die Sicherheit?

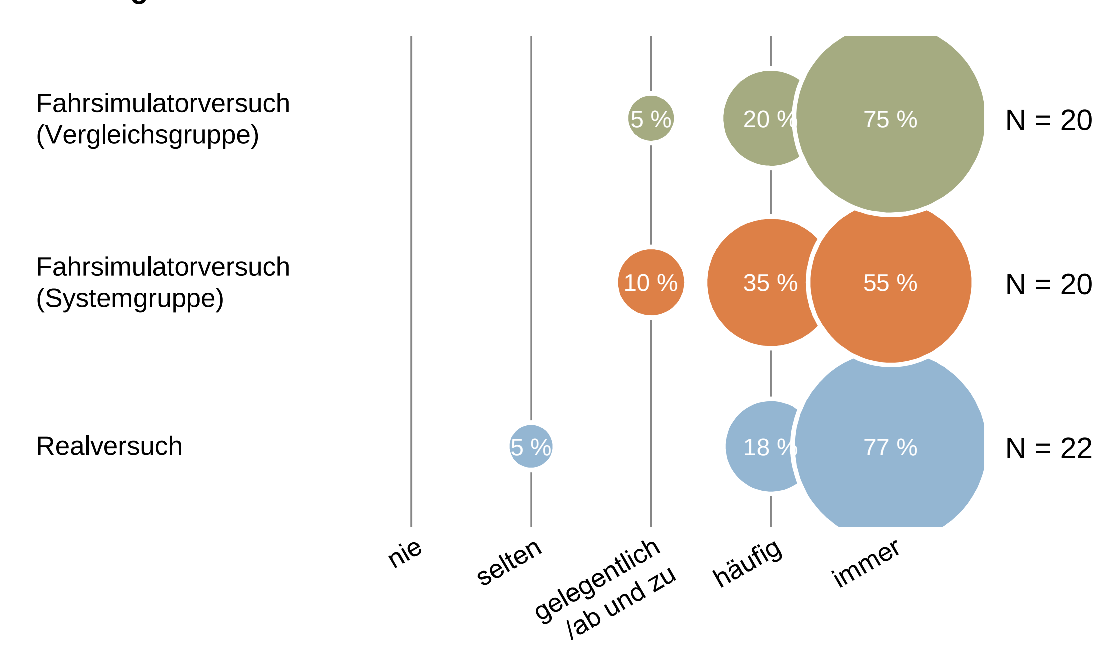


Abbildung 57: Relative Häufigkeit der Nennungen auf die Frage, wie häufig die Teilnehmer während Fahrten auf die Sicherheit achten

Alle Teilnehmer der Versuche wurden im Laufe der Untersuchung befragt, wie häufig sie während der Fahrt auf die Faktoren Fahrzeit, Komfort, Fahrspaß, Verbrauch, Verschleiß und Sicherheit achten. Im Fahrsimulatorversuch wurde diese Frage in beiden Gruppen vor der zweiten Fahrt abgeprüft, also vor der Fahrt, für die sie aufgefordert wurden möglichst effizient zu fahren. Im Realversuch wurde dieser Befragungsblock in beiden Gruppen vor der Systemfahrt durchgeführt, allerdings nach der ersten Befragung nach VAN DER LAAN et al. Abbildung 55 zeigt die Ergebnisse dieser Befragung für den Faktor „Verbrauch".

Insbesondere fällt auf, wie stark die Achtsamkeit der Systemgruppe des Fahrsimulatorversuchs hinsichtlich des Verbrauches von den beiden anderen Gruppen abweicht. 55 % der Teilnehmer der Systemgruppe geben an, selten oder nie auf den Verbrauch zu achten. In den anderen beiden Gruppen macht die Nennung „selten" lediglich 14 bzw. 20 % aus. Bemerkenswert ist diese Diskrepanz vor allem, weil sie sich nur für den Faktor „Verbrauch" in diesem Ausmaß zeigt. Exemplarisch für die fünf verbleibenden Faktoren sind die Ergebnisse des Faktors „Verschleiß" in Abbildung 56 und die der „Sicherheit" in Abbildung 57 dargestellt.

Weitere Tendenzen, die auf unterschiedliche Einstellungen deuten könnten, zeigen sich in den Ergebnissen zur Einschätzung der Nutzung (Abbildung 58) und den Situationen, in denen eine Nutzung unerwünscht ist (Abbildung 59). Die Teilnehmer des Realversuches schätzen sowohl für sich selbst als auch für ihre Kollegen die Nutzungshäufigkeit höher ein. Große Unterschiede zeigen sich für die Szenarien, in denen die Teilnehmer den ViFa ausschalten würden. Im Fahrsimulatorversuch erhält die Situation „Fahrten unter Zeitdruck" mit fast 25 % die meisten Nennungen. Im Realversuch findet sich diese Situation hingegen an vierter Stelle mit lediglich 7 % der Nennungen. Die Teilnehmer des Realversuches schätzen die Situation „bei sehr häufig gefahrenen Strecken" mit fast 40 % am relevantesten ein.



Inwieweit Versuchsleitereffekte, soziale Erwünschtheit und konformes Antwortverhalten die unterschiedlichen Ergebnisse erklären, lässt sich lediglich vermuten. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Gegenwart von zwei „beobachtenden" Personen auf engem Raum das Antwortverhalten der Teilnehmer im Realversuch stärker beeinflusst hat als im Fahrsimulatorversuch.

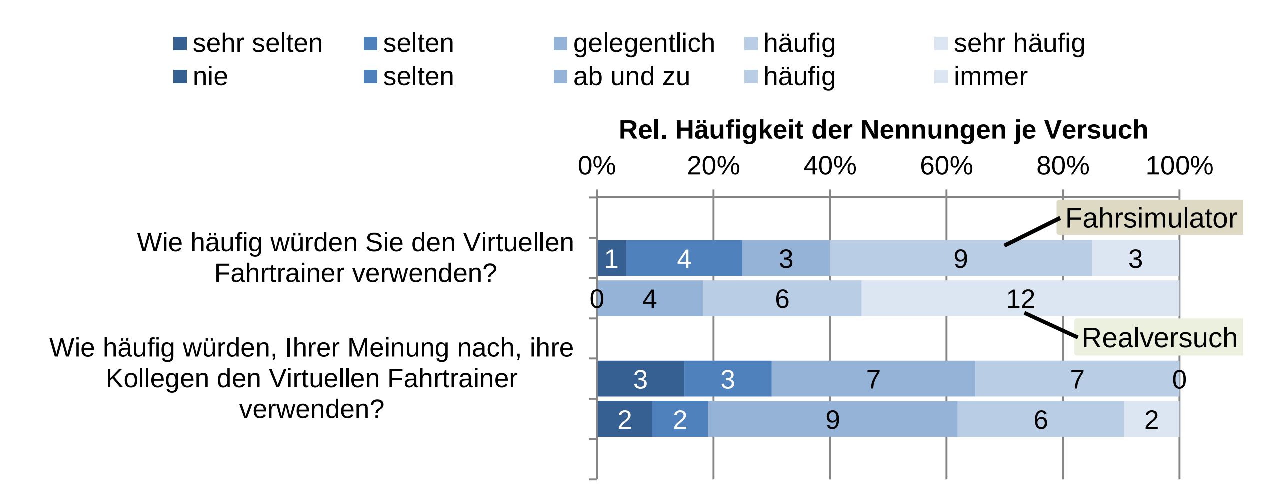


Abbildung 58: Einschätzung der Nutzungshäufigkeit des Virtuellen Fahrtrainers

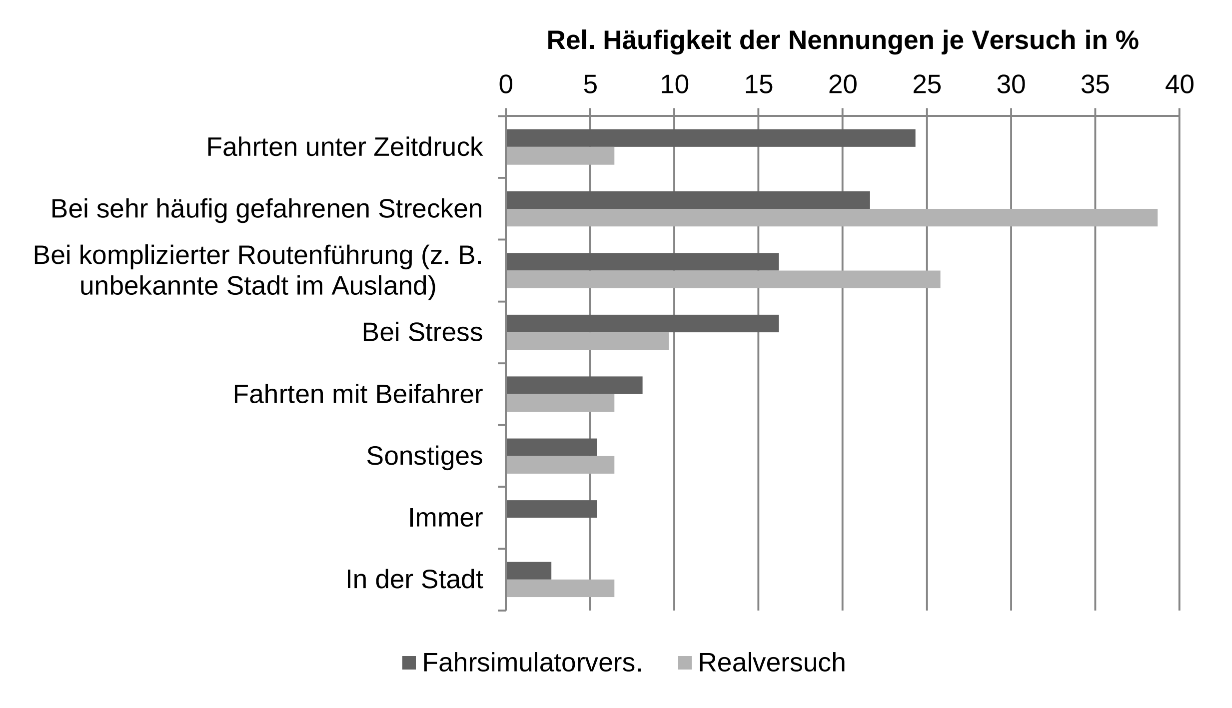


Abbildung 59: Situationen, in denen die Teilnehmer den Virtuellen Fahrtrainer ausschalten würden

Zusammenfassend kann angenommen werden, dass nicht einer, sondern alle drei zuvor genannten Effekte einen Teil der Varianz der Befragungsergebnisse erklären. In zukünftigen Versuchen sollte versucht werden, die Effekte zu quantifizieren um deren „Schadenspotential" abschätzen und Gegenmaßnahmen entwickeln zu können.

III.10 Zusammenfassung

Mit einer Anforderungsanalyse wurde zu Projektbeginn die Basis für die weiteren Arbeitsschritte gelegt. Dabei wurden systematisch die für eine wirtschaftliche Fahrweise relevanten Fahrsituationen ermittelt.

Auf diese Ergebnisse aufbauend wurden mit einer Fahranalyse tragfähige Konzepte zum sicheren Erkennen einer unwirtschaftlichen Fahrweise entwickelt. Die dafür notwendige Sensorik wurde auf ihre Eignung untersucht. Ein besonderes Augenmerk wurde auf digitale Karten gelegt, die es ermöglichen, die vorausliegenden Streckeninformationen während der Fahrt zu ermitteln. Um deren Genauigkeit abzuschätzen, wurden umfangreiche Versuche durchgeführt. Die Topografiedaten konnten mit der gezeigten Steigungsgenauigkeit die Anforderungen erfüllen. Die für den Virtuellen Fahrtrainer notwendigen Infrastrukturdaten sind ebenfalls in ausreichenden Umfängen im Kartenmaterial vorhanden und geben Geschwindigkeitsbegrenzungen, Kurvenradien und Kreuzungen in guter Qualität wieder.

Die für die Interaktion mit dem Fahrer notwendige Mensch-Maschine-Schnittstelle wurde in einem mehrstufigen Entwicklungsprozess abgeleitet. Grundlegende Fragestellungen der Motivation wurden in einer Fokusgruppe geklärt und die konkreten Anforderungen in einem Probandenversuch ermittelt. Darauf aufbauend wurden die Schnittstellenelemente ausgestaltet und deren Ausgabe auf einem Anzeigegerät dargestellt.

Im Rahmen der Akzeptanzüberprüfung in einer Fahrsimulatorstudie erzielte der Virtuelle Fahrtrainer ein hohes Akzeptanzniveau. Objektive Daten bestätigen die Wirksamkeit und zeigen, dass die Fahrhinweise die Wirtschaftlichkeit erhöhen und den Kraftstoffverbrauch signifikant senken.

In Vorbereitung eines Realversuches wurde ein Demonstrator aufgebaut, der die Funktion des Virtuellen Fahrtrainers im realen Straßenverkehr erlebbar macht. Die notwendigen Sensoren und Steuergeräte wurden hierfür in einen Versuchsträger integriert und sukzessive in Betrieb genommen.

Durch eine umfangreiche Funktionsvalidierung durch Experten konnten die Funktionen des Virtuellen Fahrtrainers weiter abgestimmt werden und die Parametrierung der Akzeptanzschwellen verfeinert werden.

In einem abschließenden Realversuch bewies der Virtuelle Fahrtrainer seine Alltagstauglichkeit im realen Straßenverkehr. Auch hier stieß das Fahrerassistenzsystem auf sehr positive Resonanz bei den Probanden, die damit den Kraftstoffverbrauch deutlich senken konnten.

Insgesamt hat das Projekt gezeigt, dass der Virtueller Fahrtrainer ein geeignetes und zielführendes Instrument ist, die Wirtschaftlichkeit im Nutzfahrzeugbereich zu steigern. Den Fahrern werden durch konkrete Fahrhinweise nützliche Zusatzinformationen an die Hand gegeben, die eine deutlich wirtschaftlichere Fahrweise ermöglichen.

IV Literaturverzeichnis

[Abu12] ABUHAMDEH, Sami ; CSIKSZENTMIHALYI, Mihaly: *The importance of challenge for the enjoyment of intrinsically motivated, goal-directed activities.* In: *Personality & social psychology bulletin* 38 (2012), Nr. 3, S. 317–330

[And10] Andersson, J.: Applying Model-Based Design to an on-board driver support system for economic driving, MathWorks Automotive Conference, 2010

[Ass01] ASSISTANT SECRETARY OF DEFENSE FOR COMMAND, CONTROL, COMMUNICATIONS, AND INTELLIGENCE: *GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE PERFORMANCE STANDARD.* October, 2001

[Aut09] Auto-News: Mehr Effizienz: Neue Spritsparmaßnahmen von Audi; Online in Internet: http://www.auto-news.de/auto/news/anzeige_Mehr-Effizienz-Audi-bringt-neues-Start-Stopp-System-auf-den-Markt_id_24363I, 2009 [Stand 2014-02-25]

[Ban77] BANDURA, Albert: *Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change.* In: *Psychological Review* 84 (1977), Nr. 2, S. 191–215

[Bau13] BAUMGARTNER, Christopher: *Entwicklung und Implementierung einer Meldungsfilterung für ein Verbrauchsassistenzsystem.* Garching, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Semesterarbeit, unveröffentlicht (2013)

[Ben83] v. Benda, H.: Klassifikation und Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach, 1983.

[Ben14] BENMIMOUN, Mohamed ; PÜTZ, Andreas ; ZLOCKI, Adrian ; ECKSTEIN, Lutz: Wirkungsanalyse von Abstandsregelung und Abstandswarnung. In: SIEBENPFEIFFER, Wolfgang (Hrsg.): *Vernetztes Automobil.* Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 27–36

[BMW07] BMW AG: BMW EfficientDynamics. Schaltpunktanzeige. Online in Internet: http://www. bmw.com/com/de/insights/technology/efficient_dynamics/phase_2/ technologies/ gearshift_change_indicator.html [Stand 2009-01-07]

[Bos13] BOSCH SENSORTEC: *Data sheet BMP 180 : Digital pressure sensor.* 05.04.2013

[Bra13] BRAUN, Daniel G.: *Streckenplanung eines Simulatorfahrversuchs mit anschließender Effizienzanalyse eines Verbrauchsassistenzsystems.* Garching, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Semesterarbeit, unveröffentlicht (15.03.2013)

[Brä13] BRÄHLER, Hermann ; RHEIN, Bernd: 4 Lastkraftwagen- und Anhängerfahrgestell. In: HOEPKE, Erich; BREUER, Stefan (Hrsg.): *Nutzfahrzeugtechnik : Grundlagen, Systeme, Komponenten.* 7. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch).

[Bre11] BREUER, Markus: *Was ist Gamification?* In: intelligent gamification. URL http://intelligent-gamification.de/2011/05/11/was-ist-gamification/ – Überprüfungsdatum 2014-03-20

[BUN09] Bundesverband Güterverkehr Logistik und Entsorgung: Informationen zur LKW-Maut, 2009

[Dai07] Daimler AG: Actros. Betriebsanleitung Online. 09/2007. Online in Internet: http: //www4.mercedes-benz.com/d/trucks/actros/betriebsanleitung/vertiefen /N140D8. html#N140F2 [Stand 2011-07-16]

[Dau12a] DAUN, Thomas J. ; LIENKAMP, Markus: Spielend Fahren: Gamification-Konzept für Fahrerassistenzsysteme. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): *6. VDI-Fachtagung Useware 2012 : Mensch, Maschine, Interaktion.* Düsseldorf : VDI-Verlag, 2012 (VDI-Berichte, 2179), S. 269–282

[Dau12b] DAUN, Thomas: *Fahrerassistenzsystem und Fahrerassistenzverfahren*. Schutzrecht PCT/EP 2013/073578 Patentanmeldung (idF v. 12.11.2013). Technische Universität München. Pr.: DE 10 2012 022 931.3 Patentanmeldung (23.11.2012)

[Dau13] DAUN, Thomas J. ; BRAUN, Daniel G. ; FRANK, Christopher ; HAUG, Stephan ; LIENKAMP, Markus: Evaluation of driving behavior and the efficacy of a predictive eco-driving assistance system for heavy commercial vehicles in a driving simulator experiment. In: *2013 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC 2013),* 2013, S. 2379–2386

[Dav86] DAVIS, Fred D.: *A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-user Information Systems: Theory and Results.* Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management. Ph. D. Thesis (1986. URL http://books.google.de/books?id=hbx8NwAACAAJ

[Dav89] Davis, F.D.: Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS quarterly, 1989.

[Dör10] Dörner, K.; Zimmermann, A.; Kahle, J.; Tigges, G.; Heyes, D.: Projekt Vifa-Virtueller Fahrtrainer, Förderantrag, unveröffentlicht, 2010.

[Dos06] DOSTLER, W. ; GERLOFF, O. ; PETZOLD, H.: *Schulungsunterlagen des MAN Service : Themenbereich Konstantfahrt.* (unveröffentlichtes Dokument). – München: MAN Nutzfahrzeuge AG (2006)

[Dur11] Durekovic, S.: Architectures of Map-Supported ADAS. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Baden-Baden, 2011

[Esc13] ESCH, Thomas ; DAHLHAUS, Ulrich: 6 Antrieb. In: HOEPKE, Erich; BREUER, Stefan (Hrsg.): *Nutzfahrzeugtechnik : Grundlagen, Systeme, Komponenten.* 7. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch).

[Jus12] JUST, Thomas: *Anforderungs- und Machbarkeitsanalyse von Sensorkonzepten zur Steigungsermittlung im Lastkraftwagen.* Garching, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Studienarbeit, unveröffentlicht (31.05.2012)

[Fas95] Fastenmeier, W.: Autofahrer und Verkehrssituation, Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme Verlag TÜV Rheinland, Köln, Bonn, 1995

[Fas07] Fastenmeier, W.; Gstalter, H.: Driving task analysis as a tool in traffic safety research and practice Safety Science 45, S. 952-979, 2007

[FTM14] Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM): *Fahrsimulator.* URL http://www.ftm.mw.tum.de/index.php?id=302 – Überprüfungsdatum 2014-03-06

[Gei08] Geiler, M., Kerwien, H.: Wirksamkeitsstudie zu einem Training ökonomischen Fahrens. Z. f. Verkehrssicherheit 54 Nr. 3, S.138, 2008.

[Goo12] Google: Google Maps. http://maps.google.de/maps?hl=de&tab=wl (Datum des Zugriffes: 09.10.2012)

[Goo13] Google: Google Maps. http://maps.google.de/maps?hl=de&tab=wl (Datum des Zugriffes: 21.10.2013)

[Hal03] HALFMANN, Christoph ; HOLZMANN, Henning: *Adaptive Modelle für die Kraftfahrzeugdynamik.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2003 (VDI-Buch)

[Ham08] HAMM, Horst: *Wie Lkw umweltfreundlicher fahren.* In: *natur+kosmos* (03/2008), Sonderbeilage, S. 2–8

[Hel07] HELLSTRÖM, Erik: *Look-ahead Control of Heavy Trucks utilizing Road Topography.* Linköping, Linköpings universitet, Department of Electrical Engineering (2007. URL http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:23829/FULLTEXT01.pdf – Überprüfungsdatum 2014-03-23

[Her12] HERING, Ekbert (Hrsg.); SCHÖNFELDER, Gert (Hrsg.): *Sensoren in Wissenschaft und Technik : Funktionsweise und Einsatzgebiete.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012

[Hes12] HESSE, Stefan ; SCHNELL, Gerhard: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation : Funktion - Ausführung - Anwendung.* 5., korrigierte und verbesserte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012

[Hey12] Heyes, D.; Hipp, E.; Zimmermann, A.; Römersperger, X.; Raudszus, D.; Lienkamp, M.: Systematische Bewertung des Fahrereinflusses auf die Transporteffizienz von Nutzfahrzeugen, 5. Tagung Fahrerassistenz, München, 2012

[Hey13] Heyes, D.; Zimmermann, A.; Daun, T.; Lienkamp, M.: Der Virtuelle Fahrtrainer – ein prädiktives Verbrauchsassistenzsystem für schwere Nutzfahrzeuge, 6. Tagung Fahrerassistenz, München, 2013

[Hip13] E. Hipp, K. Dörner, M. Seitz, D. Heyes, “Beanspruchungsadaptive Fahrerunterstützung, der Weg zum sicheren und effizienten Fahren“ 6. Darmstädter Kolloquium. Darmstadt, 2013

[Hsu07] Hsu, C.L.; Lu, H.P.: Consumer behavior in online game communities: A motivational factor perspective. Computers in Human Behavior, 23(3), 2007

[Hub08] M. Huber, "Verfahren zum Betreiben eines Fahrzeugs, insbesondere eines Nutzfahrzeugs, Steuerung / oder Auswerteeinrichtung, Fahrerassistenzsysgteme für ein Nutzfahrzeuzg sowie Nutzfahrzeug", Patent DE 10 2998 023 135 A1, 2008.

[Koc08] KOCK, P. ; WELFERS, H. J. ; PASSENBERG, P. ; GNATZIG, S. ; STURSBERG, O. ; ORDYS, A.: Energieeinsparung beim Betrieb von Nutzfahrzeugen durch prädiktive Regelungsstrategien in der Längsdynamikregelung. In: *Energieeinsparung durch Elektronik im Fahrzeug : Baden-Baden Spezial 2008 ; 3. VDI-Tagung Baden-Baden, 15. und 16. Oktober 2008.* Düsseldorf : VDI-Verlag, 2008 (VDI-Berichte, 2033).

[Kor12] Kornberger, T.: Entwicklung eines Motivationskonzeptes für ein digitales Fahrerassistenzsystem zum kraftstoffeffizienten Fahren; Diplomarbeit, Ludwigs-Maximilians- Universität München, 2012

[Kru94] Krueger, R.A.: Focus Groups. A Practical Guide for Applied Research. 2. Auflage, Thousand Oaks: SAGE, Publications Inc., 1994

[Küs87] KÜSTER, Ursula ; REITER, Karl: Technikwissen und Fahrverhalten junger Fahrer : Eine empirische Studie, Lfd. Nr. 160. In: Bundesanstalt für Strassenwesen, Bereich Unfallforschung (Hrsg.): *Forschungsberichte der Bundesanstalt für Strassenwesen : Bereich Unfallforschung.* Bergisch Gladbach, 1987, S. 1–133

[Laa97] LAAN, Jinke D. van der ; HEINO, Adriaan ; WAARD, Dick de: *A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics.* In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 5 (1997), Nr. 1, S. 1–10

[Man08] MAN Nutzfahrzeuge Gruppe: Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik, München, 2008

[Man10] MAN Nutzfahrzeuge AG: MAN Support TeleMatics. Benutzerhandbuch TeleMatics. München: MAN Nutzfahrzeuge AG, 2010

[Man00] Manser, M.; Rakauskas, M.;Graving, J.; Jenness, J.: Fuel Economy Driver Interfaces: Develop Interface Recommendations (Report on Task 3), National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 811 319, Minneapolis, 2010

[Mat14] MathWorks: *Simulink - Simulation und Model-Based Design - MathWorks Deutschland.* URL http://www.mathworks.de/products/simulink/ – Überprüfungsdatum 2014-03-07

[Moh09] MOHRA, Holger: Kraftstoffeinsparung im Nutzfahrzeug – Entwicklung eines Onboard-Verbrauchsassistenten. In: *1. Automobiltechnisches Kolloquium : Assistenzsysteme, Antriebsaggregate, Antriebsstrang.* Düsseldorf : VDI-Verlag, 2009 (VDI Wissensforum).

[Moh13] MOHRA, Holger Roland: *Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung einer energieeffizienten Fahrweise.* München : Dr. Hut, 2013 (Fahrzeugtechnik)

[Moo01] Moon, J.W.; Kim, Y.G.:. Extending the TAM for a World-Wide-Web context. Information & management, 38(4), 2001

[Neg07] NEGELE, Hans-Jürgen: *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung.* Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Dissertation (2007. URL http://mediatum.ub.tum.de/?id=620855)

[Rau11] Raudszus, D.: Situationsanalyse und Potentialabschätzung zur Kraftstoff- und Verschleißreduktion durch vorausschauendes Fahrerverhalten, Diplomarbeit, 2011

[Rhe10] RHEINBERG, F.: Intrinsische Motivation und Flow-Erleben. In: HECKHAUSEN, Jutta; HECKHAUSEN, Heinz (Hrsg.): *Motivation und Handeln.* 4., überarbeitete und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010 (Springer-Lehrbuch), S. 365–387

[Rot11] ROTH, Martin ; RADKE, Tobias ; LEDERER, Matthias ; GAUTERIN, Frank ; FREY, Michael ; STEINBRECHER, Christian ; SCHRÖTER, Jens ; GOSLAR, Markus: Porsche InnoDrive – An Innovative Approach for the Future of Driving. In: Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen RWTH Aachen University; Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University (Hrsg.): *20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2011.* Aachen, 2011, S. 1453–1467

[Say07] SAYER, James R. ; LEBLANC, David J. ; MEFFORD, Mary Lynn ; DEVONSHIRE, Joel: Field Test Results of a Road Departure Crash Warning System: Driver Acceptance, Perceived Utility and Willingness to Purchase. In: *Proceedings of the 4th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design : Driving assessment 2007.* Iowa City, Iowa : University of Iowa, Public Policy Center, 2007

[SPI12] SPIEGEL ONLINE: *Effizienzerziehung für Autofahrer: Spielen und sparen -.* URL http://www.spiegel.de/auto/aktuell/sprit-sparen-durch-spiele-fuer-autofahrer-a-842225.html. – Aktualisierungsdatum: 2012-07-04 – Überprüfungsdatum 2014-03-29

[Sta13] STAUBACH, Maria ; SCHEBITZ, Norbert ; KREHLE, Timo ; OELTZE, Katharina ; KUCK, Detlef: User acceptance of an eco-driving support system. In: *Proceedings - 9th ITS European Congress.* Dublin, 2013

[StV12] StVZO (idF v. 26.04.2012) § 57c (2): *Ausrüstung von Kraftfahrzeugen mit Geschwindigkeitsbegrenzern und ihre Benutzung.* URL http://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/__57c.html – Überprüfungsdatum 2014-03-22

[StV13] StVO (idF v. 06.03.2013) § 3 (5) 1.: *Autobahnen und Kraftfahrstraßen.* URL http://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/__3.html – Überprüfungsdatum 2014-03-22

[Sue07] sueddeutsche.de GmbH: Öko-Pedal von Nissan. Gruß vom Gaspedal. 04/08/2008. Online in Internet: http://www.sueddeutsche.de/automobil/923/304895/text/ [Stand 2009-01-07]

[Süß13] SÜßMANN, Alexander ; SCHABERT, Alexander ; LIENKAMP, Markus: Analyse von kundenspezifischen Verbrauchseinsparpotentialen durch Aerodynamik-, Roll-widerstands- und Leichtbaumaßnahmen. In: *12. Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge 2013 : Truck, Bus, Van, Trailer.* Düsseldorf : VDI-Verlag, 2013 (VDI Berichte, 2186), S. 113–126

[Swe88] SWELLER, John: *Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning.* In: *Cognitive Science* 12 (1988), Nr. 2, S. 257–285

[Tel10] Tele Atlas: Advanced Driving Attributes - Map support for driving safety and efficiency, Herstellerinformation, 2010

[Ter10] TERWEN, Stephan: *Vorausschauende Längsregelung schwerer Lastkraftwagen.* Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS). Dissertation (2010. URL http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000015696 – Überprüfungsdatum 2014-03-23

[Ven96] VENKATESH, Viswanath ; DAVIS, Fred D.: *A Model of the Antecedents of Perceived Ease of Use: Development and Test.* In: *Decision Sciences* 27 (1996), Nr. 3, S. 451–481

[Ven00] Venkatesh, V.; Davis, F.D.: A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. Management science, 2000.

[Vol11] Volvo Trucks Region Central Europe GmbH: 80 oder 90 km/h - das ist hier die Frage. In: *Jeder Tropen zählt! : Alles zum Thema Kraftstoffsparen (*Truck News Extra), 08/2011, S. 17

[Voo01] VOORT, Mascha Cécile van der: *Design and evaluation of a new fuel-efficiency support tool.* Enschede, Universiteit Twente. Dissertation (2001)

[Wah07] Wahlberg, A.: Long-term effects of training in economical driving: Fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback. In International journal of industrial ergonomics, Vol. 37, No. 4, S. 333-343, 2007

[Wit11] Wittenbrink, P: Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr, Wiesbaden: Gabler 2011

[WIV14] WIVW - Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH: *Fahrsimulationssoftware SILAB.* URL http://www.wivw.de/ProdukteDienstleistungen/SILAB/index.php.de – Überprüfungsdatum 2014-03-06

[Züh12] ZÜHLKE, Detlef: *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen : Useware-Engineering für technische Systeme.* Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012 (VDI-Buch)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundprojekt: ViFa - Virtueller Fahrtrainer - Entwicklung eines virtuellen Fahrtrainers zur Unterstützung einer verbrauchs- und verschleißoptimierten Fahrweise Gemeinsamer Schlussbericht	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Heyes, Daniel[1] Daun, Thomas J.[2] Dörner, Karlheinz[1] Lienkamp, Markus[2]	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2013 6. Veröffentlichungsdatum 31.03.2014 7. Form der Publikation öffentlicher Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) [1]MAN Truck & Bus AG Abteilung ERE Dachauer Str. 667 80995 München [2]Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM) Technische Universität München Boltzmannstr. 15 85748 Garching	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 10. Förderkennzeichen 19 G 10013A 19 G 10013B 11. Seitenzahl 85
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Villemombler Str. 76 53107 Bonn	13. Literaturangaben 75. 14. Tabellen 6 15. Abbildungen 59
16. Zusätzliche Angaben k.A.	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TÜV Rheinland Consulting GmbH, PT MVt, 51101 Köln, 31.03.2014	
18. Kurzfassung Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projekts war es, ein Assistenzsystem – den Virtuellen Fahrtrainer – zu entwickeln, das den Fahrer bei der Einhaltung einer kraftstoffeffizienten Fahrweise unterstützt. Mit einer systematischen Anforderungsanalyse wird zu Projektbeginn eine solide Basis für die weiteren Arbeiten gelegt. Darauf aufbauend wurden mit einer Fahranalyse tragfähige Konzepte zum sicheren Erkennen einer unwirtschaftlichen Fahrweise entwickelt. Die dafür notwendige Sensorik wurde auf ihre Eignung untersucht. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf digitalem Kartenmaterial, das es ermöglicht, die vorausliegenden Streckeninformationen während der Fahrt zu bereitzustellen. Die für die Interaktion mit dem Fahrer notwendige Mensch-Maschine-Schnittstelle wurde in einem mehrstufigen Entwicklungsprozess abgeleitet. Grundlegende Fragestellungen der Motivation wurden in einer Fokusgruppe geklärt und die konkreten Anforderungen in einem Probandenversuch ermittelt. Bei der Akzeptanzüberprüfung in einer Fahrsimulatorstudie bestätigten die Probanden die motivierende Wirkung des Virtuellen Fahrtrainers und konnten den Kraftstoffverbrauch signifikant senken. In Vorbereitung eines Realversuches wurde ein Demonstrator aufgebaut, der die Funktion des Virtuellen Fahrtrainers im realen Straßenverkehr erlebbar macht. In einem abschließenden Realversuch bewies der Virtuelle Fahrtrainer seine Alltagstauglichkeit im realen Straßenverkehr. Auch hier stieß das Fahrerassistenzsystem auf sehr positive Resonanz bei den Probanden, die damit den Kraftstoffverbrauch deutlich senken konnten.	
19. Schlagwörter Virtueller Fahrtrainer, Fahrerassistenzsystem, Kraftstoffeffizienz	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Verbundprojekt: ViFa - Virtueller Fahrtrainer - Entwicklung eines virtuellen Fahrtrainers zur Unterstützung einer verbrauchs- und verschleißoptimierten Fahrweise Gemeinsamer Schlussbericht	
4. author(s) (family name, first name(s)) Heyes, Daniel[1] Daun, Thomas J.[2] Dörner, Karlheinz[1] Lienkamp, Markus[2]	5. end of project 30.09.2013 6. publication date 31.03.2014 7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) [1]MAN Truck & Bus AG Abteilung ERE Dachauer Str. 667 80995 München [2]Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM) Technische Universität München Boltzmannstr. 15 85748 Garching	9. originator's report no. 10. reference no. 19 G 10013A 19 G 10013B 11. no. of pages 85
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 75 14. no. of tables 6 15. no. of figures 59
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH, PT MVt, 51101 Köln, 31.03.2014	
18. abstract The goal of the project supported by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) was to develop an assistance system – the Virtual Driving Trainer - which assists the driver in achieving a fuel-efficient driving style. A solid foundation for future work was created at the start of the project by a systematic requirements analysis. Based on this, workable concepts were developed for reliable recognition of an uneconomical driving style. The sensors required for this were tested for their suitability. A particular focus of attention was on digital map material that allows the information on the route ahead to be made available while driving. The man-machine interface needed for interaction with the driver was created in a multi-stage development process. Basic questions on motivation were clarified in a focus group and the specific requirements then determined in a trial with test persons. In the acceptance validation conducted in a driving simulator study, the test persons confirmed the motivating effect of the Virtual Driving Trainer and were able to significantly reduce fuel consumption. In preparation for a test under real conditions, a demonstrator was set up to make it possible to experience the functionality of the Virtual Driving Trainer under real traffic conditions. In a final real-life test, the Virtual Driving Trainer proved its everyday suitability under real driving conditions. Here too, the driver assistance system was very well received by the test persons, who were also able to significantly reduce fuel consumption as a result.	
19. keywords Virtual Driving Trainer, driver assistance system, fuel efficiency	
20. publisher	21. price